

ESTUDIO DEL MATERIAL PARTICULADO DE TAMAÑO MENOR A 10 MICRAS
(PM₁₀) EN EL AIRE AMBIENTE DE LA ZONA ALEDAÑA A LA UNIVERSIDAD
LIBRE – SEDE CANDELARIA

JULIETH CATERINE CABALLERO HERRERA
DANIEL FERNANDO VALENCIA ORTIZ

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero
Ambiental

Director: RUTH ALEJANDRA CATACOLÍ JIMÉNEZ
Ingeniera M.Sc

Universidad Libre
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Ambiental
Bogotá, 31 de agosto del 2018

RESUMEN

Esta investigación estableció cuáles son las fuentes de emisión de PM_{10} más importantes en la zona aledaña a la Universidad Libre – Sede Candelaria, se realizó una simulación de emisiones por fuentes móviles por medio del software MOVES de la EPA y se analizó la tasa de emisión obtenida con los modelos de dispersión de celda fija y de columna de humo gaussiana. También, se realizó un muestreo durante 18 días para determinar la concentración promedio diaria de PM_{10} en la zona, y se analizaron las muestras recolectadas por medio de la técnica de espectrometría infrarroja con transformada de Fourier para identificar los minerales presentes en el contaminante. Finalmente, se utilizó un modelo lineal de estimación de mortalidad para conocer el número de muertes anuales que pueden resultar de la exposición de la comunidad a los niveles de material particulado encontrados. Se encontró que el flujo vehicular es la principal fuente de emisión de PM_{10} en la zona de estudio con una tasa promedio de emisión de 596 g PM_{10} /hora, lo que puede resultar en una exposición de 73 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para los peatones mientras transitan cerca a la vía; la concentración promedio diaria fue de 28,43 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y entre la composición del contaminante se encontró cuarzo, caolinita, vermiculita, esmectita, polygorskita, sepiolita entre otros que se pueden asociar al desarrollo de cáncer pulmonar, enfermedad pleuroparenquimal, asbestosis, obstrucción de las vías respiratorias y ataques de asma.

Palabras clave: Material particulado, emisiones vehiculares, minerales, espectroscopía infrarroja FTIR, enfermedades cardiovasculares, calidad del aire.

ABSRTACT

This study looked for the most important emission sources of particulate matter in the area around the Universidad Libre – Sede Candelaria, the motor vehicle emissions simulator MOVES by EPA was used to estimate how much particulate matter mobile sources emit in a day and then they were put through the fixed box and gaussian plume dispersion models. A PM₁₀ sampling was carried out for 18 days to determine its average daily concentration, and the samples were analyzed by Fourier transform infrared spectroscopy to identify which minerals compose the studied pollutant. Finally, a linear model for mortality rate was used in order to find how many deaths per year can be expected if PM₁₀ levels maintain the average daily value found by this study. It was found that vehicle transit is the main PM emission source in the area of study, with an average emission rate of 595 g PM₁₀/hour, which may result in an exposition of 73 µg/m³ for pedestrians while they walk near the street; the average daily concentration of PM₁₀ was 28,43 µg/m³ and minerals such as quartz, kaolinite, vermiculite, smectite, polygorskite and sepiolite were found in the particles' composition, which are associated with the development of diseases such as lung cancer, pleuroparenchymal syndrome, asbestosis, airways blockage and asthma attacks.

Keywords: Particulate matter, vehicle emissions, minerals, FTIR spectroscopy cardiovascular disease, air quality.

Tabla de contenido

| | |
|--|----|
| 0. INTRODUCCIÓN | 5 |
| 1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA | 6 |
| 2. JUSTIFICACIÓN | 8 |
| 3. OBJETIVOS | 10 |
| 3.1 OBJETIVO GENERAL | 10 |
| 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 10 |
| 4. MARCO REFERENCIAL | 11 |
| 4.1 Marco Teórico | 11 |
| 4.1.1 Material particulado: Origen, fuentes y precursores | 11 |
| 4.1.2 Comportamiento en la atmósfera del contaminante PM ₁₀ | 17 |
| 4.1.3 Efectos sobre la salud por exposición a PM ₁₀ | 19 |
| 4.2 Marco Conceptual | 21 |
| 4.3 Marco Tecnológico | 25 |
| 4.3.1 Muestreo de Material Particulado | 25 |
| 4.3.2 Modelación con software MOVES | 26 |
| 4.4 Marco Legal | 28 |
| 4.5 Marco Geográfico | 31 |
| 5. METODOLOGÍA | 35 |
| 5.1 Estimación del aporte de las fuentes móviles de emisión de PM ₁₀ | 37 |
| 5.2 Determinación de la concentración promedio diaria de PM ₁₀ en el aire ambiente de la zona | 39 |
| 5.3 Identificación de los minerales presentes en el PM ₁₀ recolectado | 40 |
| 5.4 Evaluación del riesgo: dosis-respuesta | 41 |
| 6. FUENTES DE EMISIÓN DE MATERIAL PARTICULADO EN LA ZONA | 42 |
| 6.1 Fuentes Fijas | 42 |
| 6.2 Fuentes Móviles | 43 |
| 6.3 Modelo de dispersión | 46 |
| 7. DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE PM₁₀ | 49 |
| 7.1 Lugar de muestreo | 49 |
| 7.2 Acondicionamiento y pesado de filtros | 51 |
| 7.3 Muestreo | 51 |
| 7.4 Cálculo de la concentración | 53 |
| 8. IDENTIFICACIÓN DE MINERALES | 61 |
| 8.1 Obtención de los espectros | 61 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 8.2 | Identificación de minerales | 62 |
| 9. | ANÁLISIS DEL RIESGO POR EXPOSICIÓN A PM₁₀ | 67 |
| 9.1 | Identificación del peligro | 67 |
| 9.2 | Evaluación de la exposición | 67 |
| 9.3 | Evaluación de la dosis-respuesta | 67 |
| 9.4 | Caracterización del riesgo | 68 |
| 10. | LIMITACIONES | 71 |
| 11. | CONCLUSIONES | 73 |
| | BIBLIOGRAFÍA | 74 |

Lista de Tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Métodos de análisis utilizados para la caracterización química de material particulado | 14 |
| Tabla 2. Longitudes de onda del FTIR para minerales | 15 |
| Tabla 3 . Instituciones Expedidoras de Normativa Sobre Calidad del Aire en Colombia..... | 28 |
| Tabla 4. Estudio Meteorológico de Bogotá | 32 |
| Tabla 5. Metodología | 35 |
| Tabla 6. Entradas para la escala Condado en MOVES | 37 |
| Tabla 7. Parámetros para cálculo de concentración de PM ₁₀ | 53 |
| Tabla 8. Diferencia del muestreo con estaciones RMCAB cercanas | 59 |
| Tabla 9. Minerales encontrados..... | 65 |
| Tabla 10. Información de entrada para el cálculo de dosis promedio | 69 |
| Tabla 11. Dosis promedio y coeficientes de riesgo | 70 |

Lista de Imágenes

| | |
|---|----|
| Imagen 1. Modelo de celda fija | 38 |
| Imagen 2. Columna de humo gaussiana | 38 |
| Imagen 3. Procesamiento de la información en el software Tracker. | 43 |
| Imagen 4. Base de datos locales de MOVES | 45 |
| Imagen 5. Parámetros de simulación MOVES | 45 |
| Imagen 6. Unidades de reporte MOVES | 45 |
| Imagen 7. Edificio entrada Universidad Libre Sede Candelaria | 49 |
| Imagen 8. Acondicionamiento de filtros | 51 |
| Imagen 9. Pesaje inicial | 51 |
| Imagen 10. Transporte de los filtros | 51 |
| Imagen 11. Pesaje final | 51 |
| Imagen 12. Instalación de equipo Hi-Vol y Estación DAVIS | 52 |
| Imagen 13. Calibración del equipo Hi-Vol..... | 52 |
| Imagen 14. Registro de datos en campo | 52 |
| Imagen 15. Registro de datos en laboratorio | 53 |
| Imagen 16. Preservación de los filtros | 53 |
| Imagen 17. Rosa de los Vientos Muestreo (02/03/2018 - 21/03/2018) | 57 |
| Imagen 18. Rosa de los Vientos (Filtro 4 - 04/03/2018) | 57 |
| Imagen 19. Rosa de los Vientos (Filtro 16 - 17/03/2018) | 57 |
| Imagen 20. Rosa de los Vientos (Filtro 19 - 20/03/2018) | 57 |
| Imagen 21. Construcción de cápsulas (Muestras + KBr)..... | 61 |
| Imagen 22. Creación del blanco (Filtro + KBr)..... | 61 |
| Imagen 23. Obtención del espectro corregido | 61 |

Lista de Cuadros

| | |
|--|----|
| Cuadro 1. Normatividad Sobre la Calidad del Aire en Colombia hasta el año 2010 | 29 |
| Cuadro 2. Normatividad Sobre la Calidad del Aire en Colombia desde el Año 2011 hasta el Año 2017 | 30 |
| Cuadro 3. Normatividad Sobre la Calidad del Aire en Bogotá | 30 |
| Cuadro 4. Método Hi-Vol PM ₁₀ (MAVDT, 2010) | 39 |
| Cuadro 5. Flujo vehicular en la intersección Cl. 8va x Cra. 6ta | 44 |
| Cuadro 6. Emisiones de PM ₁₀ provenientes de fuentes móviles | 46 |
| Cuadro 7. Ficha técnica de estaciones de monitoreo | 50 |
| Cuadro 8. Concentración diaria de PM ₁₀ durante el muestreo | 54 |
| Cuadro 9. Temperatura promedio diaria durante el muestreo | 55 |
| Cuadro 10. Precipitación diaria durante el muestreo | 55 |
| Cuadro 11. Humedad relativa promedio diaria durante el muestreo | 56 |
| Cuadro 12. Velocidad del viento promedio diaria durante el muestreo | 56 |

Lista de Mapas

| | |
|---|----|
| Mapa 1 - Universidad Libre: Sede Candelaria | 33 |
| Mapa 2. Distribución de fuentes fijas monitoreadas por la SDA | 42 |
| Mapa 3. PM ₁₀ en Bogotá (04/03/2018) | 58 |
| Mapa 4. PM ₁₀ en Bogotá (17/03/2018) | 58 |
| Mapa 5. PM ₁₀ en Bogotá (08/03/2018) | 58 |
| Mapa 6. PM ₁₀ en Bogotá (07/03/2018) | 58 |
| Mapa 7. IDW PM ₁₀ Bogotá - Sin estación Candelaria (02/03/2018 - 20/03/2018) | 58 |
| Mapa 8. IDW PM ₁₀ Bogotá - Incluyendo estación Candelaria (02/03/2018 - 20/03/2018) | 58 |

Lista de Espectros

| | |
|--|----|
| Espectro 1. FTIR Muestra 4, Cuarzo | 62 |
| Espectro 2. FTIR Muestra 6, Caolinita | 63 |
| Espectro 3. FTIR Muestra 11, Vermiculita | 63 |
| Espectro 5. FTIR Muestra 7, Palygorskita | 64 |
| Espectro 6. FTIR Muestra 5, Sepiolita | 64 |
| Espectro 7. FTIR Muestra 3, Imogolita | 65 |
| Espectro 8. FTIR Muestra 9, Asbesto | 65 |

0. INTRODUCCIÓN

El material particulado (PM) es uno de los contaminantes criterio para definir la calidad del aire en un lugar y momento específicos. Este contaminante es generado por fuentes como vehículos y canteras por procesos de combustión y trituración de piedra respectivamente. En Bogotá, los procesos industriales y el uso de combustibles fósiles resultan en niveles que exceden los límites máximos recomendados por la Organización Mundial de la Salud. Debido a que la exposición a PM está asociada a incremento de la mortalidad y desarrollo o empeoramiento de enfermedades cardiovasculares y respiratorias, se hace necesario ampliar el conocimiento sobre la situación actual de la ciudad en cuanto a su calidad del aire respecto al PM. En el presente estudio se determina la concentración promedio diaria de PM₁₀ (y su presencia de minerales) en la zona aledaña a la Universidad Libre – Sede Candelaria, identificando las fuentes de emisión y analizando el riesgo que suponen para la comunidad.

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El aire se considera contaminado cuando contiene materiales indeseables en cantidad suficiente como para generar efectos dañinos en los seres humanos, los animales, la vegetación, las estructuras arquitectónicas o el medio ambiente (Nevers, 1998). Los humanos respiran 14 kilogramos de aire cada día, y debido a los contaminantes presentes en el aire, se pueden llegar a sufrir daños crónicos, agudos y carcinógenos. Uno de estos contaminantes es el material particulado, que se refiere a todas las partículas presentes en el aire y de tamaño suficientemente reducido como para no depositarse rápidamente en el suelo por efecto gravitacional y ser inhaladas fácilmente (Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 1980). Una partícula tiene un tamaño mayor a 0,2 nanómetros, o 0,0002 micrómetros, pero menor a 500 micrómetros, y puede durar en el aire unos pocos segundos hasta varios meses. Estas partículas pueden tener origen natural, como la erosión, erupciones volcánicas e incendios; o antropogénico, con fuentes como el uso de combustibles fósiles, actividades agrícolas, entre otros. Además, puede contener en su composición sustancias químicas tóxicas y cancerígenas, tales como plomo, mercurio, cadmio, asbestos, cuarzo, calcita, caolinita, pirofilita, Vermiculita, Esmeclita, etc. (Secretaría Distrital de Ambiente, 2015).

El crecimiento poblacional y desarrollo tecnológico ligado al uso de combustibles fósiles de las ciudades han resultado en un incremento acelerado de la concentración de material particulado. Este problema fue tratado en la cumbre de la tierra celebrada en Río de Janeiro de 1992, en la que las naciones acordaron establecer los parámetros necesarios para una calidad del aire adecuada en los sectores de alto riesgo. En Colombia, para el año 2015, se habían establecido 174 estaciones de monitoreo encargadas de vigilar e informar sobre la calidad del aire en diferentes partes del país (SDA, 2015).

Según el Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia (IDEAM, 2017) las ciudades de Medellín y Bogotá presentan los niveles más altos en el país. Bogotá cuenta con una Red de Monitoreo de Calidad del Aire (RMCAB), que está compuesta por 13 estaciones fijas de monitoreo y una estación móvil que reportan continuamente información sobre las concentraciones de los contaminantes criterio

en el aire de la ciudad; entre los dichos contaminantes se encuentra el material particulado. En el 2014, la concentración promedio anual de este contaminante excedió la norma en cinco estaciones de monitoreo de calidad del aire, con concentraciones de hasta $91 \mu\text{g}/\text{m}^3$; y en el 2015, superó el valor máximo fijado por la resolución 610 del 2010 (derogada por la resolución 2254 del 2017) en tres estaciones, con concentraciones de hasta $87 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá, 2016).

Mediante el Decreto 623 del 2011, la Alcaldía Mayor de Bogotá clasificó a las localidades La Candelaria, Los Mártires, Rafael Uribe, San Cristóbal, y partes de las localidades Suba, Santa Fe, Usme y Engativá; como áreas fuente de contaminación clase II (es decir, área que excede la norma anual de calidad del aire respecto a PM_{10} con una frecuencia entre el 50% y el 70% de los casos). De igual manera, asigna responsabilidades a la Secretaría Distrital de Ambiente para establecer medidas de contingencia en áreas fuente de esta clase (Alcaldía de Bogotá, 2011). La Universidad Libre - Sede Candelaria se encuentra en la Calle 8 No. 5-80, en donde se presentan emisiones de PM_{10} asociadas al flujo vehicular de las Calles Octava y Novena con Carreras Quinta y Sexta. La estación de monitoreo de calidad del aire más cercana a la Universidad Libre – Sede Candelaria, MINAMBIENTE, se encuentra a más de 2,5 km de distancia (SDA, 2018), en dicha distancia, las variables que afectan la concentración de material particulado (como dirección y velocidad del viento y presencia de fuentes de emisiones) pueden cambiar drásticamente, dando como resultado una incertidumbre considerable al momento de interpolar la información para el área de interés, por lo que no se cuenta con información puntual precisa sobre las concentraciones del contaminante en el aire de esta zona. Teniendo en cuenta que por la zona transita un gran número de personas diariamente y que no se cuenta con mediciones locales de PM_{10} en la zona de estudio, se formula como problema: ¿Cuál es el estado de la calidad del aire ambiente respecto a material particulado en las zonas aledañas a la Universidad Libre – Sede Candelaria?

2. JUSTIFICACIÓN

La reglamentación del material particulado comenzó con la Ley de Aire Limpio de 1970 de la EPA, que estableció concentraciones límites PST (partículas suspendidas totales) en periodos de 24 horas, para evitar los padecimientos leves por exposición de corta duración; y periodos anuales, para evitar las enfermedades crónicas por exposición de larga duración (Nebel & Wright, 1999). Para Colombia, la norma dicta que, a condiciones de referencia, la concentración máxima permitida de PM_{10} en un periodo de 24 horas es de $75 \mu g/m^3$ y de $50 \mu g/m^3$ para un año (MADS, 2017).

El material particulado afecta en mayor medida a quienes padecen de enfermedades cardiacas o pulmonares, adultos mayores y niños. El PM_{10} puede ingresar a los pulmones e incluso infiltrarse en el torrente sanguíneo, tras lo cual causa enfermedades y malfuncionamientos cardiacos y respiratorios (EPA, 2003). Además, el material particulado agota el suelo, cambia el flujo de nutrientes, y mancha y deteriora estructuras, por lo que genera problemas agrícolas a gran escala y pérdidas considerables en remediación del daño de suelos de cultivo y ganado (EPA, 2015).

Aunque se han realizado numerosos estudios que han resultado en un mayor conocimiento de la contaminación atmosférica respecto al material particulado en Bogotá en la última década, las fuentes e impactos han aumentado, por lo que se hace necesario realizar más investigación sobre la concentración y las características químicas de este y así fundamentar el desarrollo de estrategias políticas de protección y recuperación de la calidad del aire en el futuro. Así entonces, se propone el presente estudio como una primera aproximación a la situación actual de la calidad del aire en las zonas aledañas a la Universidad Libre - Sede Candelaria. Las personas que transiten por la zona de estudio, se ven expuestos a los contaminantes que puedan estar presentes en el aire. Conocer la concentración y características minerales del PM_{10} presente en el aire ambiente de la zona permitirá determinar el riesgo al que se encuentra expuesta la población,

además, la información obtenida será un aporte al conocimiento académico sobre la contaminación atmosférica en Bogotá y sobre la necesidad de controlar las emisiones de material particulado en la ciudad.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar la calidad del aire ambiente respecto a PM_{10} en la zona aledaña a la Universidad Libre, Sede Candelaria.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estimar el aporte de las fuentes generadoras de material particulado a la concentración de PM_{10} en las zonas aledañas a la Universidad Libre – Sede Candelaria.
- Establecer el cumplimiento de los niveles de PM_{10} en la zona aledaña a la Universidad Libre, Sede Candelaria de acuerdo con la resolución 2254 del 2017.
- Identificar cualitativamente los minerales presentes en el PM_{10} recolectado, por medio de la técnica de espectrometría infrarroja con transformada de Fourier.
- Evaluar el riesgo a la salud de la población por los niveles de PM_{10} según la metodología de evaluación del riesgo a la salud humana para la toma de decisiones de la EPA (2014).

4. MARCO REFERENCIAL

4.1 Marco Teórico

Este trabajo se centra en la concentración de PM_{10} en el aire de la zona aledaña a la Universidad Libre, Sede Candelaria; las fuentes de emisión responsables por dicha concentración y los efectos que ésta pueda tener en la salud de los estudiantes y trabajadores, de acuerdo al modelo Fuente – Medio – Receptor, según el cual se tienen en cuenta el origen, comportamiento e impactos causados por el contaminante; por tanto, es necesario entender varias características fundamentales respecto al material particulado.

4.1.1 Material particulado: Origen, fuentes y precursores

El Material particulado se clasifica en PST o Partículas Suspendidas Totales de diámetro esférico menor a 100 micras, PM_{10} se refiere a la fracción gruesa del material particulado respirable, cuya denominación comienza a descender desde las partículas gruesas con un diámetro menor a $10\ \mu m$ y tiene origen tanto natural como antropogénico. Asimismo, se utilizan otras dos clasificaciones, son las partículas finas o $PM_{2,5}$ y las partículas ultrafinas o $PM_{0,1}$ (Nevers, 1998).

La fracción gruesa respirable del material particulado (PM_{10}) suele ser insoluble y no higroscópica y puede ser formada por procesos como abrasión, evaporación de aerosoles, molienda y suspensión de polvos. En su composición se pueden encontrar cenizas de combustión, óxidos de silicio, aluminio, hierro y titanio, carbonato de calcio y sal (Rojas Bracho & Garibay Bravo, 2009).

El origen del material particulado puede clasificarse según la fuente de emisión en natural y antropogénico, o según su formación en primario y secundario. El material particulado primario es el que se emite directamente a la atmósfera por fuentes naturales, como las erupciones volcánicas y la erosión del suelo; o por fuentes antropogénicas como la combustión de combustibles fósiles. Wark y Warner (1995) exponen una lista de procesos que son fuentes de emisión de material particulado, entre dichas fuentes se encuentran los hornos para la producción de acero, que

emiten partículas de polvo, humo y óxido de hierro; las refinerías de petróleo, que emiten polvos y cenizas; la manufactura de ácido fosfórico y sulfúrico, que emite PM_{10} ácido y polvo; y la manufactura de coque, que emite alquitranes del carbón y polvo.

El material particulado secundario es el que se forma a partir de sustancias que se encuentran en la atmósfera mediante procesos químicos. Principalmente, el material particulado secundario se forma por medio de la nucleación de sus precursores, es decir, el proceso mediante el cual las moléculas de baja volatilidad se condensan para formar materia líquida o sólida. La nucleación es heterogénea cuando las sustancias se condensan sobre partículas existentes, causando su crecimiento; y es homogénea cuando las moléculas de formación reciente que tienen presiones de vapor muy bajas se condensan una sobre otra, formando partículas completamente nuevas (Defra, s.f). Entre los precursores del material particulado secundario se encuentran los óxidos de nitrógeno (NO_x) y el Dióxido de Azufre (SO_2), que son oxidados a nitratos (NO_3^-) y sulfatos (SO_4^{2-}) y posteriormente neutralizados por amoníaco (NH_3) lo cual resulta en amonio (NH_4^+); los compuestos orgánicos volátiles que son sometidos a oxidación parcial, el ácido sulfúrico (H_2SO_4) y el vapor de agua (H_2O)_(g) (EPA, 2009).

A su vez, las fuentes de material particulado primario se dividen en fuentes de área, que son un conjunto de fuentes de emisión de contaminantes de interés, como las quemas; fuentes fijas, que permanecen estacionarias y su flujo de emisiones atmosféricas suele ser constante, por ejemplo, las plantas termoeléctricas; y fuentes móviles, que se refieren a los vehículos que utilizan combustibles fósiles, particularmente, el 70% del PM_{10} tiene su origen en los motores que operan con diésel (García Lozada, 2006), lo que se debe al alto contenido de azufre en el Aceite Combustible Para Motores que utiliza una gran parte de los vehículos de Bogotá, que no sólo genera material particulado primario en forma de hollín por la combustión incompleta de los óxidos de azufre, pero también emite estos óxidos a la atmósfera, en donde pasan por el proceso de nucleación, formando material particulado secundario.

Entre los estudios que se han llevado a cabo en Bogotá, se encuentra la caracterización de la calidad del aire en microambientes en cuatro colegios distritales de la ciudad. El estudio examinó las concentraciones de PM₁₀, PM_{2,5} y Carbón Elemental en los colegios, de los cuales tres se encontraban cerca de vías principales con alto flujo vehicular, y el colegio restante se utilizó como grupo de control por estar ubicado en una zona de bajo tráfico. El estudio concluye que la concentración de contaminantes es significativamente más alta y suele exceder los límites establecidos por la norma en los colegios cercanos a vías principales que en el colegio de control, y que, por ende, los estudiantes están expuestos a niveles de contaminantes que se consideran como nocivos para la salud (Franco, Rojas, Sarmiento, & Behrentz, 2013).

Caracterización del material particulado

Por medio de sus poros y su capacidad de absorción superficial el material particulado puede contener diferentes sustancias químicas (Bautista, 2010) tales como metales pesados, silicatos y minerales, por lo cual se hace importante identificarlos de manera adecuada (Quijano, Henao, & Juliana, 2010). En la actualidad, para caracterizar material particulado existe una gran variedad de análisis químicos, que aplican técnicas para la identificación compuestos inorgánicos como orgánicos (grupos funcionales), para así conocer la composición química de este. Los análisis para iones inorgánicos en el PM son: Espectrofotometría de Absorción Atómica, Fluorescencia de Rayos X (FRX), Difracción de Rayos X (DRX), Análisis de Activación de Neutrones (NAA), Emisión de Rayos X por Inducción de Protones (PIXE), Electroquímica, Espectrometría de Masa con plasma de acoplamiento inducido (ICP-MS), Espectrometría de Emisión Atómica con plasma de acoplamiento inducido (ICP-AES), Cromatografía de Iones (IC) (Sbarato, 2000). Para la caracterización de compuestos orgánicos en el material particulado se utilizan los métodos establecidos en la Tabla 1.

Tabla 1. Métodos de análisis utilizados para la caracterización química de material particulado

| Contaminante | Técnica de análisis* |
|--|---|
| Aniones inorgánicos (Cl ⁻ , NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻ , PO ₄ ³⁻ , SO ₄ ²⁻) | · Métodos tradicionales: volumetría, gravimetría, turbidimetría, colorimetría, electrodo · HPLC-DAD, HPLC-UV-Vis, HPLC-MS, HPLC-Intercambio iónico |
| Cationes inorgánicos | · Métodos tradicionales de volumetría, colorimetría · HPLC-Intercambio iónico (Fe, Cr...) · AAS, AAS-vapor frío (Hg), AAS- Generación de hidruros (As, Se, Te, Sb, Sn, Ge). · AES (Na, Li, K, Cs) · ICP-MS, ICP-AES XFR, AAS, AES, ICP-MS, ICP-AED |
| Compuestos orgánicos volátiles, COV'S | CGC-MS, CGC-ECD, CGC-PID |
| Hidrocarburos aromáticos policíclicos, PAH'S | HPLC-DAD, HPLC-UV, HPLC- Fluorescencia, CGC-MS |
| Pesticidas | HPLC-DAD, HPLC-UV, CGC-MS, CGC-ECD |
| Policlorurobifenilicos, PCB'S | HRGC-MS, HRGC-CD |
| Fenoles | HPLC-DAD, HPLC-UV, CGC-MS, CGC-ECD |
| Dioxinas y furanos | HRGC-MS |
| Minerales (cuarzo, calcita, caolinita, esmectita, vermiculita, entre otros) | FTIR (cualitativa), DRX (cuantitativo) |

* Siglas utilizadas en la denominación de las técnicas

HPLC - Cromatografía líquida de alta resolución con detector de diodos integrados

DAD - Detector de diodos integrados, diodo array

UV-Vis - Detector Ultravioleta-Visible

MS – Detector de masa

AAS - Espectrofotometría de Absorción atómica

AES - Espectrofotometría de Emisión atómica

ICP– MS - Espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inducido

ICP– AES - Espectrometría de Emisión Atómica con plasma de acoplamiento inducido

ECD - Detector de captura electrónica, CGC - Cromatografía de Gases Capilar

HRGC – Cromatografía de gases de alta resolución

PID - Detector de fotoionización

MS - Detector de masas

XRF – Fluorescencia de Rayos X

FTIR - Fourier-transform infrared spectroscopy

DRX - Difracción de Rayos X

Nota: Adaptado de Characterization of minerals in air dust particles in the state of Tamilnadu, India through FTIR, XRD and SEM analyses, (Kumar & Rajkumar, 2014).

La espectrometría infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) es una técnica de análisis química que lleva desarrollándose alrededor de 125 años y es una de las maneras más eficaces y apropiadas para observar espectros vibracionales. Las características más importantes de esta técnica de análisis son: a) si dos moléculas tienen átomos distintos, entonces tendrán espectros infrarrojos diferentes, b) se podrá obtener la huella digital de cualquier sustancia definida, c) se obtienen picos característicos de los grupos funcionales, d) la intensidad de las bandas obtenidas son indicadores de la concentración de una sustancia, e) es un análisis o ensayo no destructivo en algunas ocasiones, es decir, que se conserva físicamente la muestra y f) el tiempo que tardan los instrumentos para dar el espectro infrarrojo es de tan solo minutos (Bautista, 2010). Además, este análisis químico ayuda a medir los diferentes minerales, con las longitudes de onda y asignación tentativa que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Longitudes de onda del FTIR para minerales

| SI. No. | Minerales | Onda No. (cm ⁻¹) | Asignación tentativa |
|---------|-----------------------|---|---|
| 1 | Cuarzo | 400-800 900-1100 | Si-O curvado simétrico, Si-O estiramiento simétrico |
| 2 | Calcita | 876, 1422, 1431, 1636, 1786, 1792, 1798, 2516, 2570, 2873, 2982 | Doblemente degenerado estiramiento asimétrico, estiramiento del CO ₃ , estiramiento de C=O, modo combinado, estiramiento del O-H |
| 3 | Caolinita | 433, 938, 1623, 3623, 3695, 3735 | Deformación de Si-O, deformación O-H, estiramiento del O-H |
| 4 | Caolinita desordenada | 478 | Deformación Si-O-Si |
| 5 | Pirofilita | 737 | O-H fuera del plano de flexión |
| 6 | Vermiculita | 670, 811 | Curvado simétrica de Si-O, O-H fuera del plano de flexión |
| 7 | Esméctica | 522 | Deformación de Al-O-Si |
| 8 | Paligorsquita | 414, 512, 567, 1647, 1681, 3611 | Deformación de Si-O, estiramiento de Si-O, deformación de O-H |
| 9 | Sepiolita | 422, 1657, 3246, 3619 | Estiramiento de O-H |
| 10 | Imogolita | 602 | Deformación O-H |
| 11 | Proto imogolita | 680, 854 | Doblamiento de Si-O |

| Sl. No. | Minerales | Onda No. (cm ⁻¹) | Asignación tentativa |
|---------|------------------|---|--|
| 12 | Hematites | 536 | Fe-O |
| 13 | Asbestos | 1033 | Estiramiento de Si-O |
| 14 | crisolito | 405,453 | Estiramiento de Si-O |
| 15 | Dolomita | 582,2628 | Estiramiento de C-O |
| 16 | Nacrita | 905,915,1005,3648 | Estiramiento de Si-O, Deformación Al-Al-OH, Estiramiento de O-H |
| 17 | Magnetita | 577,717 | Doblamiento de Fe-O |
| 18 | Gibbsite | 3300,3529 | Estiramiento de O-H |
| 19 | Aragonito | 1457,2520 | Doblamiento de C-O, Estiramiento de OAH |
| 20 | Montmorillonita | 3405 | Estiramiento de H-O-H |
| 21 | Carbón orgánico | 2853,2921 | Estiramiento de C-H |
| 22 | Grupo feldespato | 635,645,1772,727, 1113,440,591,1019, 3417 | Coordinación de Al-O, Estiramiento de Si-O, Doblamiento de O-H, Estiramiento de O-H, Deformación O-H |
| 23 | Goethita | 495,894 | Doblamiento de Fe (III)-O-Si, Doblamiento de O-H |
| 24 | Hectorita | 656 | Estiramiento de Si-O |
| 25 | Biotita | 3712 | Estiramiento de O-H |
| 26 | Dickite | 755 | Al-O-Si Perpendicular |
| 27 | Beidellite | 886 | Deformación Al-Fe ³⁺ -OH |
| 28 | Glauconita | 984,3588 | Estiramiento de SiAO, Estiramiento de O-H |
| 29 | Celadonita | 1099 | Estiramiento de Si-O |
| 30 | Anorthite | 1159 | Estiramiento de Si-O |
| 31 | Baritina | 1182 | Estiramiento de Si-O-Si |
| 32 | Cerussita | 1385,1399 | Doblamiento de C-O |
| 33 | Ankerite | 1448 | Doblamiento de C-H |
| 34 | Altitile | 788,3675 | Estiramiento de O-H |

Nota: Adaptado de Characterization of minerals in air dust particles in the state of Tamilnadu, India through FTIR, XRD and SEM analyses, (Kumar & Rajkumar, 2014).

4.1.2 Comportamiento en la atmósfera del contaminante PM₁₀

La vida media de las partículas de tamaño menor a 500 µm oscila entre unos pocos segundos hasta varios meses, especialmente, las partículas de diámetro mayor a 20 µm se sedimentan rápidamente y la fuerza de gravedad suele ser suficiente para eliminarlas del medio (Wark & Warner, 1995).

Independientemente de su origen, una vez se encuentra en la atmósfera, el material particulado no sufre ninguna transformación; y en el caso de las partículas de tamaño menor a 20 µm, su velocidad de sedimentación es fácilmente superada por los movimientos verticales del aire, por lo que, además de la aglomeración (es decir, la adhesión entre partículas, que resulta en el aumento de la masa total) y precipitación, su permanencia en el medio depende exclusivamente de los factores meteorológicos y geográficos (EPA, 2016).

Inicialmente, el comportamiento del material particulado en la atmósfera se ve influenciado por la altura a la que es emitido, a menor altura, existe un mayor riesgo de que se concentre al nivel del suelo, en dónde será inhalado por los humanos y animales o depositado en las edificaciones; simultáneamente, una emisión lenta y fría alcanzará una altura mucho menor a la que puede alcanzar una emisión rápida y a alta temperatura (García Lozada, 2006).

Si bien la baja masa y velocidad de sedimentación del material particulado favorecen su permanencia en la atmósfera, estos factores, y especialmente en la fracción respirable (es decir, el PM₁₀), también causan que éste sea desplazado por el viento, a tal punto que, si se dan las condiciones apropiadas de temperatura y velocidad del viento, puede suceder una dispersión muy amplia de las partículas, disminuyendo así su concentración y, por ende, el daño que pueda causar en la salud de quienes lo respiren.

Según Rojas y Garibay (2009), el PM₁₀ suele permanecer suspendido en la atmósfera hasta varias horas tras su emisión y desplazarse distancias menores a 10 kilómetros antes de que se depositen. El movimiento atmosférico horizontal se da principalmente como consecuencia de las diferencias de temperatura en la

superficie terrestre y la aceleración de Coriolis, la cual causa una desviación aparente de las corrientes de aire respecto al movimiento del planeta al utilizar su eje de rotación como punto de referencia y desvía los vientos hacia la izquierda en el hemisferio sur y hacia la derecha en el hemisferio norte. El movimiento atmosférico vertical se debe a la densidad de las porciones de aire, se genera un empuje vertical que hace que la porción de aire ascienda y, de igual manera, las porciones de aire con mayor densidad descenderán como efecto de un empuje vertical negativo (Nevers, 1998).

La topografía del terreno influye significativamente en la velocidad y dirección del viento, áreas planas favorecen un flujo constante de viento y optimizan las condiciones para una atmósfera inestable, es decir, con un movimiento del viento a velocidades considerables, mientras que un lugar pequeño delimitado por montañas presentará baja velocidad del viento, y, por ende, una lenta dispersión horizontal de contaminantes (García Lozada, 2006).

La temperatura en Bogotá oscila entre los 5°C y 23°C en temporada seca, y entre 8°C y 20°C en temporada de lluvia; esto dificulta el flujo atmosférico normal (entendiendo por flujo atmosférico normal la elevación del aire caliente, que se lleva consigo los contaminantes) ya que dichas oscilaciones dan lugar a inversiones térmicas. En Bogotá, las inversiones térmicas más comunes se deben a que durante la noche la temperatura es menor cerca del suelo, por lo que la capa de aire más cercana a la superficie no se eleva y encima de ella se sobrepone una capa de aire caliente, interrumpiendo el movimiento ascendiente del aire y, por tanto, causando que los contaminantes no se puedan dispersar fácilmente (Organización Meteorológica Mundial, 2013), resultando en altas concentraciones de material particulado al nivel del suelo, sobre el cual se puede presentar inmisión, afectando la salud de las personas. En el Informe del Día Sin Carro del 22 de abril de 2015 se atribuyó a la inversión térmica del mismo día el aumento en 6% de la concentración de PM₁₀ respecto al promedio de los días hábiles del año 2014 (SDA, 2015).

4.1.3 Efectos sobre la salud por exposición a PM₁₀

Las partículas de diámetro menor a 10 µm presentan un gran riesgo para la salud, puesto que pueden ingresar al sistema respiratorio e incluso infiltrarse en el torrente sanguíneo, generando padecimientos pulmonares y cardíacos. Para evaluar la gravedad de la exposición a un contaminante es necesario tener en cuenta la dosis del contaminante, esto es, la concentración de la sustancia nociva en un tiempo determinado.

Si bien las normas sobre concentraciones máximas permisibles de PM₁₀ y PM_{2,5} se han establecido en consideración a estudios sobre los niveles de inmisión perjudiciales para la salud humana, no se ha encontrado una concentración umbral bajo la cual no se presenten efectos adversos en las personas.

Al inhalar, el aire entra por la nariz, en dónde se aumenta su temperatura y disminuye su densidad, luego de pasar por la faringe, la tráquea, los bronquios y los bronquiolos, llega finalmente a los alvéolos para oxigenar la sangre. Durante su recorrido, el aire es despojado de partículas grandes por medio del recubrimiento pegajoso de los órganos que componen el sistema respiratorio, y, aun así, el PM₁₀ es capaz de llegar a los pulmones, burlando las otras defensas del sistema como la epiglotis, la contracción bronquial como respuesta a la irritación, el recubrimiento de los alvéolos que remueve parte los gases y partículas que contengan y la tos y los estornudos. Entre los efectos adversos a la salud que puede causar el material particulado se encuentran: la reacción fibrosa de los pulmones polvos de minerales, que resulta en dificultades al respirar; irritación de los ojos; enfermedades crónicas respiratorias; reacciones alérgicas al polvo, que pueden llegar incluso a obstrucción parcial de las vías respiratoria, generando riesgo de muerte en casos graves de alergia, desarrollo de enfermedades de cáncer debido a el contenido de metales pesados (que cruzan la membrana plasmática de la célula, tras lo cual establecen enlaces con biomoléculas y modifican la célula, causando un crecimiento y multiplicación desproporcionados de la misma) en el material particulado, especialmente del que proviene de procesos de combustión incompleta o la manufactura de compuestos químicos; efectos tóxicos, que se dan gracias a las

fracciones más pequeñas de material particulado capaces incluso de viajar por medio del flujo sanguíneo, llegando a diversos órganos del cuerpo (García Lozada, 2006).

Suponiendo un mismo tiempo de exposición, el mayor riesgo se pronostica para las personas de avanzada edad, con enfermedades pulmonares y cardiovasculares, infantes y personas que realicen mucha actividad física, ya que esto incrementa su velocidad de respiración y, por ende, el volumen de material particulado que inhalan (EPA, 2003).

La exposición a altas concentraciones de material particulado puede tener diversos efectos en la salud humana dependiendo de su duración. Las exposiciones prolongadas (anuales) a concentraciones mayores de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{10} están asociadas a mortalidad a largo plazo, enfermedades cardiopulmonares y cáncer de pulmón. Por otra parte, la exposición de corta duración (24 horas) a concentraciones mayores a $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ está asociada a un incremento de 1,2% aproximadamente de la mortalidad en comparación al valor de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ que establecen las guías de calidad del aire de la OMS (Organización Mundial de la Salud, 2005).

En un estudio realizado en Bogotá cuyo objetivo fue cuantificar la exposición personal a PM_{10} y determinar la prevalencia de síntomas respiratorios en 574 oficiales de policía (de los cuales 477 eran policías de tráfico y 97 laboraban en oficina) se encontró una relación directa entre el aumento de la dosis de PM_{10} y los síntomas respiratorios demostrados por los individuos. El grupo de policías de tráfico demostró mayor prevalencia de irritación nasal, conjuntivitis, tos, expectoración, entre otros; y exposición a concentración promedio de un 62% mayor de PM_{10} en comparación al grupo que se desempeña en oficina (Estévez García, Rojas Roa, & Rodríguez Pulido, 2013).

4.2 Marco Conceptual

Aire. El aire está compuesto aproximadamente de 78% de Nitrógeno, 21% de Oxígeno y cantidades mínimas de otras sustancias como Argón y Dióxido de Carbono (Nebel & Wright, 1999).

Viento. “El viento es el movimiento del aire en la atmósfera, especialmente en la tropósfera, producido por causas naturales” (SDA, 2015).

Dispersión. La dispersión es el proceso mediante el cual una sustancia contaminante se mezcla en la atmósfera, se separa en partes más pequeñas y se diluye en volúmenes más grandes de otros gases, reduciéndose así la concentración del contaminante de interés (García Lozada, 2006).

Contaminante atmosférico. El calificativo de contaminante se suele atribuir a cualquier sustancia que se encuentre en un medio, en concentración y por el tiempo suficiente para causar efectos adversos en la salud humana o animal, en los recursos naturales, el paisaje o en las construcciones. Anualmente, los cinco contaminantes emitidos a la atmósfera en mayor masa son el monóxido de carbono, óxidos de azufre, material particulado, óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles (Jaramillo Juárez, Rincón Sánchez, & Rico Martínez, 2009).

Solución verdadera. Se refiere a una solución homogénea, en la cual “las partículas del soluto son átomos, moléculas o iones dispersos en el solvente y su tamaño es menor de un nanómetro”, no se depositan al permitir el reposo de la solución (Recio del Bosque, 1998).

Coloide. Es una mezcla de una sustancia que se encuentra dispersa en otra. La sustancia dispersa es la que se encuentra en menor cantidad y tiene un tamaño de 1 a 100 nm, la que se encuentra en mayor cantidad es la sustancia o fase dispersante; ambas fases pueden encontrarse en estado gaseoso, sólido o líquido (Recio del Bosque, 1998).

Suspensión. Es un sistema heterogéneo cuyas partículas, que tienen un tamaño mayor a 100 nm, pueden sedimentarse al permitir el reposo de la solución y no pasan a través de los filtros (Recio del Bosque, 1998).

Partículas en suspensión. Este término se refiere a las partículas, bien sean sólidas o líquidas, que se encuentran en la atmósfera y permanecen en ella por periodos considerables, ya que su pequeño tamaño y masa reducen significativamente la aceleración causada por la fuerza gravitacional (Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 1980).

Wark y Warner (1985) clasifican las partículas suspendidas en el aire como: partículas, que existen en una corriente de gas en condiciones normales; aerosoles, que son una dispersión de partículas microscópicas en medios gaseosos; niebla, que se refiere a los aerosoles visibles; polvo, con un tamaño mayor a 0,0002 micras que puede estar en suspensión temporal en el aire; cenizas, que son derivados en la combustión incompleta; vapores, que provienen de reacciones químicas; neblina, es decir, partículas de diámetro menor a 10 micras y mayor a 0,001 micras; humo, que comprende a las partículas arrastradas por gases después de la combustión; y hollín, que es la aglomeración de partículas de carbón.

Aerosol. “Grupo de partículas sólidas o líquidas transportadas por el aire, con un tamaño de 0,01 a 10 μm , que pueden sobrevivir en la atmósfera al menos durante unas horas” (Stocker, y otros, 2016).

Polvo. Se refiere a las partículas de tamaño menor a 100 μm y mayor a 1 μm , su emisión suele atribuirse a procesos mecánicos y es de origen tanto natural como antropogénico (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2010).

Niebla. Es un aerosol visible cuya fase dispersa se encuentra en estado líquido (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2010).

Neblina. Consiste en la suspensión de gotas de agua en un medio gaseoso, pero, a diferencia de la niebla, la neblina no causa una reducción de visibilidad a distancias menores de un kilómetro (Servicio Meteorológico Nacional del Reino Unido, 2016)

Humo. Se refiere a las partículas formadas por la combustión incompleta y es visible en general como una dispersión homogénea (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2010).

Hollín. Consiste en partículas negras que se forman como subproducto de la combustión incompleta de materiales que contienen carbono, su composición y propiedades varían dependiendo del material del que se originan y las condiciones de la combustión (International Agency for Research on Cancer, 2012).

Smog. Este término, originado en la década de los 50, es la combinación de las palabras humo (smoke) y niebla (fog). En la actualidad, el término se utiliza para denotar una mezcla visible de contaminantes, principalmente ozono (EPA, 2004).

Diámetro aerodinámico. Es el diámetro de una partícula esférica de densidad de 1 g/cm³ con una velocidad de sedimentación gravitacional igual a la de la partícula de interés (EPA, 2004).

Nucleación. La nucleación es el proceso inicial de una transformación de fase de primer orden y consiste en la formación de un núcleo de la nueva fase. Para la formación de dicho núcleo es necesario superar la barrera de energía, es decir, alcanzar la energía necesaria para que se dé el cambio de fase; esta energía se alcanza mediante fluctuaciones térmicas en la fase estable inicial (Universidad de Barcelona, s.f).

Toxicidad. “La toxicidad es una medida del peligro inherente de una sustancia”. La toxicidad aguda se refiere a la capacidad que tiene una sustancia de causar efectos adversos importantes en la salud del individuo tras la ingestión de una dosis única. Por el contrario, la toxicidad crónica se genera por la exposición repetida al contaminante de interés, resultando en impactos graves a la salud del individuo (Jaramillo Juárez, Rincón Sánchez, & Rico Martínez, 2009).

Inmisión. La inmisión consiste en la transferencia de un contaminante que se encuentra en la atmósfera a un receptor (Ministerio de Ambiente, 2010), siendo este último un ser vivo cuya salud es susceptible a sufrir efectos adversos como consecuencia de dicho contaminante.

Exposición. La exposición se refiere al estado de un receptor en el que se encuentra en una zona cuyo aire contiene una concentración, bien sea conocida o no, del contaminante de interés, y, por tanto, puede inhalarlo o verse afectado por él de otra manera (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, s.f).

Dosis. La dosis depende de la concentración y el tiempo de exposición y se refiere a la cantidad absorbida de un contaminante al que está expuesto un receptor (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, s.f).

4.3 Marco Tecnológico

4.3.1 Muestreo de Material Particulado

Los equipos utilizados para determinar la concentración de material particulado en una muestra de aire pueden clasificarse según el alcance de su funcionamiento como muestreadores o analizadores.

Muestreador: es aquel que se limita a recolectar muestras, las cuales deberán ser analizadas en laboratorio para que sea posible conocer la masa de material particulado que fue recolectada. Estos equipos pueden ser manuales, los cuales requieren que un operador cambie el medio filtrante tras cada muestreo; o semiautomáticos, que son capaces de realizar varios muestreos sin necesidad de la intervención de un operador hasta que se agoten los filtros disponibles.

El muestreo se compone de tres fases: Pre-muestreo, fase durante la cual se inspeccionan, numeran, desecan, pesan y almacenan los filtros; muestreo, fase para la cual se verifica el estado del equipo, se registran los datos de operación, se instala el filtro y se programa el temporizador; y la fase Post-muestreo, que consiste en el pesado y almacenamiento del filtro utilizado, el cálculo de la concentración de material particulado, la validación de los datos y, finalmente, el reporte de los resultados (MAVDT, 2010).

El Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire desarrollado por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial establece el estándar nacional para la determinación de material particulado de tamaño menor a 10 μm en la atmósfera mediante un Muestreador de alto volumen (HI-VOL). El equipo Muestreador “arrastra aire ambiente a una velocidad de flujo constante hacia una entrada de forma especial donde el material particulado se separa por inercia en uno o más fracciones dentro del intervalo de tamaño de PM_{10} ”. Cada fracción se colecta en un filtro, el cual es pesado antes y después del muestreo, la diferencia entre los resultados del pesado es la masa del material particulado que se capturó,

esta masa es dividida en el volumen de aire muestreado (el cual se debe determinar a partir de la velocidad de flujo y el tiempo de muestreo); el resultado de esta división es la concentración másica de material particulado para el periodo de muestreo (MAVDT, 2010).

Analizador: Los equipos analizadores son automáticos y además de recolectar las muestras, se valen de métodos ópticos y eléctricos para determinar la concentración del contaminante de interés, para finalmente reportar un resultado.

En Colombia, los equipos analizadores de material particulado pueden utilizar dos métodos para el análisis de la muestra:

- **Absorción Beta:** Se recolecta el material particulado por medio de una cinta, sobre la cual inciden rayos beta generados con Carbono-14 o Prometio-147, posteriormente, la intensidad de los rayos beta es medida después de que han sido atenuados por el material particulado capturado en la cinta, esta intensidad es relacionada con la masa de PM recolectada. En el resultado final, se realiza una corrección por la absorción de la cinta recolectora (MAVDT, 2010).
- **Micro balanza oscilante de elemento cónico:** Para este método se utiliza un filtro intercambiable ubicado al final de un tubo afilado cuyo extremo ancho está fijo, este tubo vibra en su frecuencia natural hasta que se hace pasar la muestra de aire por el filtro, cuando el material particulado es capturado por el filtro su masa alterará la vibración del tubo. La disminución en la frecuencia de vibración del tubo se relaciona con la masa de material particulado muestreado (MAVDT, 2010).

4.3.2 Modelación con software MOVES

El software MOVES (Motor Vehicle Emissions Simulator) es desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos y tiene como objetivo proveer una estimación precisa de las emisiones provenientes de fuentes móviles.

Para lograr dicho objetivo el programa hace uso de un amplio rango de condiciones definidas por el usuario.

El proceso de modelación requiere que el usuario especifique el tipo de vehículo (es posible seleccionar más de uno) y sus condiciones de operación, estado (aplica únicamente a estudios en Estados Unidos), contaminantes de interés, periodos de tiempo y tipos de vías.

A partir de la información proporcionada por el usuario, MOVES realiza una serie de cálculos que han sido desarrollados para reflejar con un alto nivel de exactitud los procesos operativos vehiculares y los factores de emisión. Finalmente, el programa entrega un reporte con las emisiones estimadas para el escenario propuesto y, adicionalmente, permite realizar comparaciones con escenarios ligeramente modificados para evaluar el potencial impacto de regulaciones políticas que promuevan cambios en el combustible utilizado, disminución del parque automotor o actualizaciones tecnológicas (EPA, 2010).

4.4 Marco Legal

Actualmente, la normatividad que regula el nivel de inmisión en Colombia es la Resolución 2254 del 2017, que establece límite máximo permisible de 75 $\mu\text{g PM}_{10}/\text{m}^3$ para 24 horas y de 50 $\mu\text{g PM}_{10}/\text{m}^3$ anual; adicionalmente, fija los rangos de concentración para la definición del índice Bogotano de Calidad del Aire.

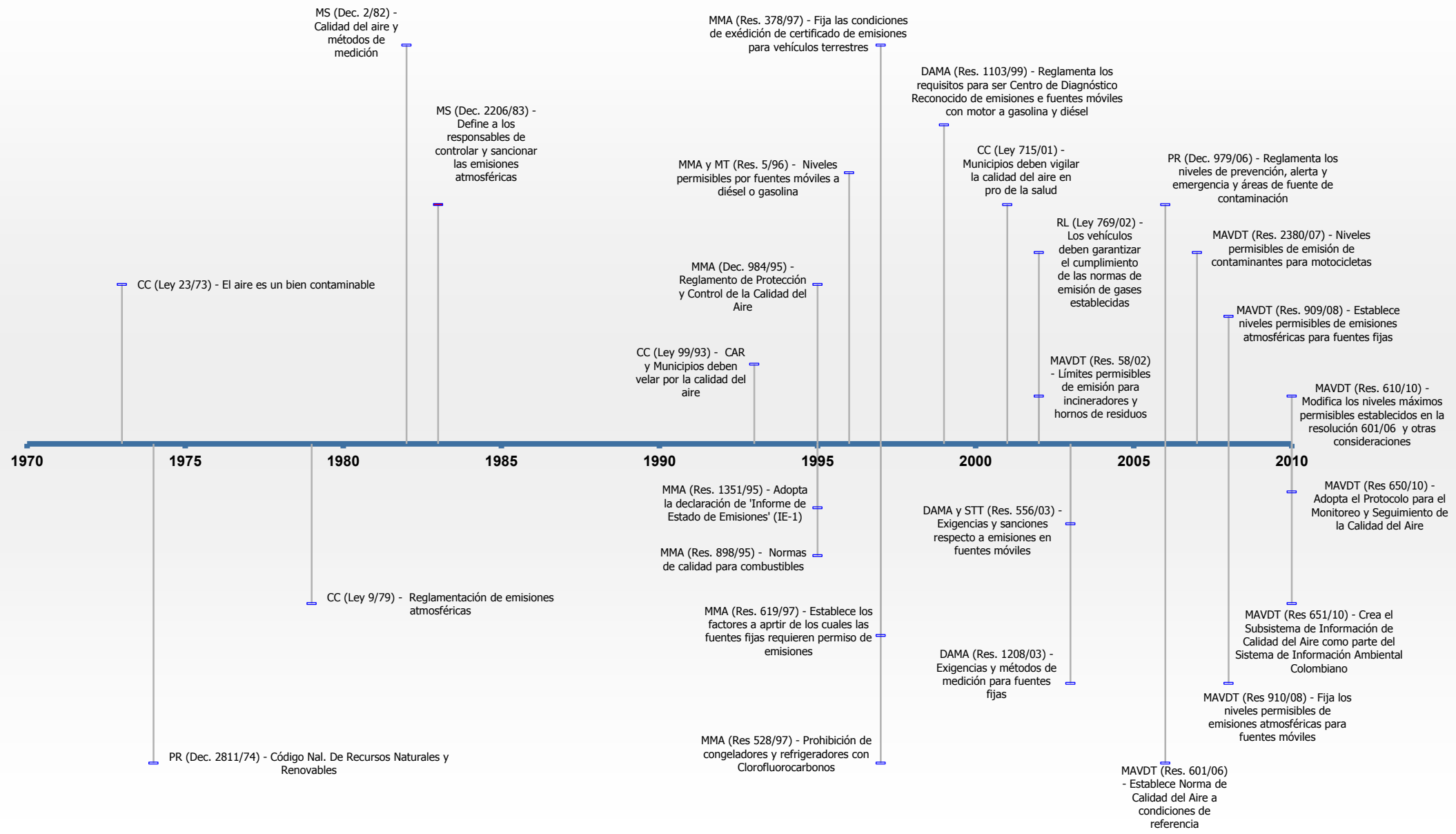
La siguiente tabla recoge las abreviaciones utilizadas para denotar las autoridades que han expedido cada norma mostrada en los cuadros 1, 2 y 3 sobre normativa de calidad del aire en Colombia.

(MADS, s.f)

Tabla 3 . Instituciones Expedidoras de Normativa Sobre Calidad del Aire en Colombia

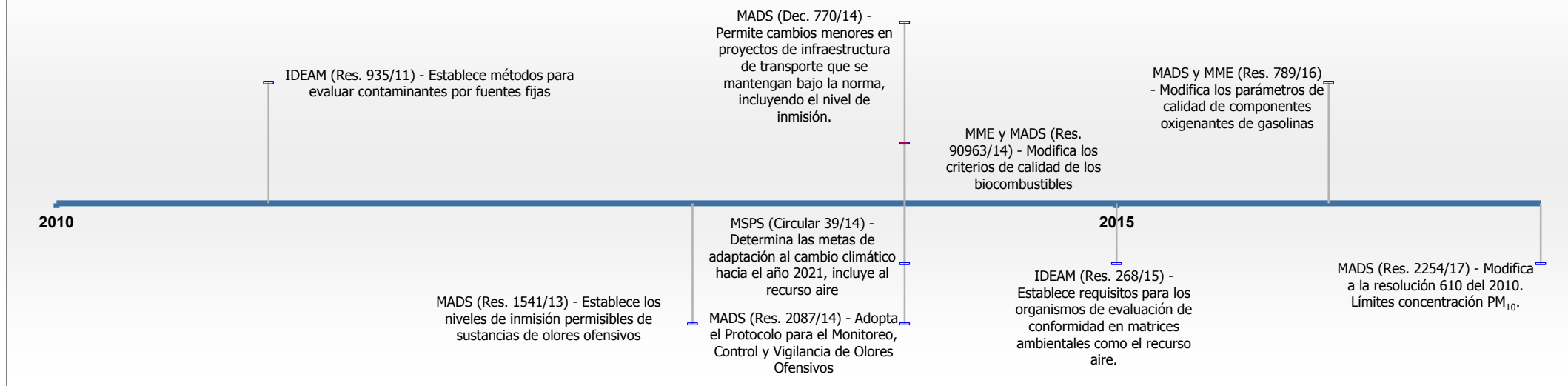
| Abreviación | Institución | Abreviación | Institución |
|--------------------|---|--------------------|--|
| CC | Congreso de Colombia | MS | Ministerio de Salud |
| PR | Presidencia de la República | MT | Ministerio de Transporte |
| IDEAM | Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales | RL | Poder Público - Rama Legislativa |
| MADS | Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2011 – Actualidad) | STT | Secretaría de Tránsito y Transporte de Bogotá |
| MAVDT | Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2002 – 2011) | SDA | Secretaría Distrital de Ambiente |
| MMA | Ministerio del Medio Ambiente (1993 – 2002) | SDS | Secretaría Distrital de Salud |
| MME | Ministerio de Minas y Energía | AMB | Alcaldía Mayor de Bogotá |
| MSPS | Ministerio de Salud y Protección Social | DAMA | Departamento Administrativo del Medio Ambiente |

Normatividad Sobre la Calidad del Aire en Colombia hasta el año 2010



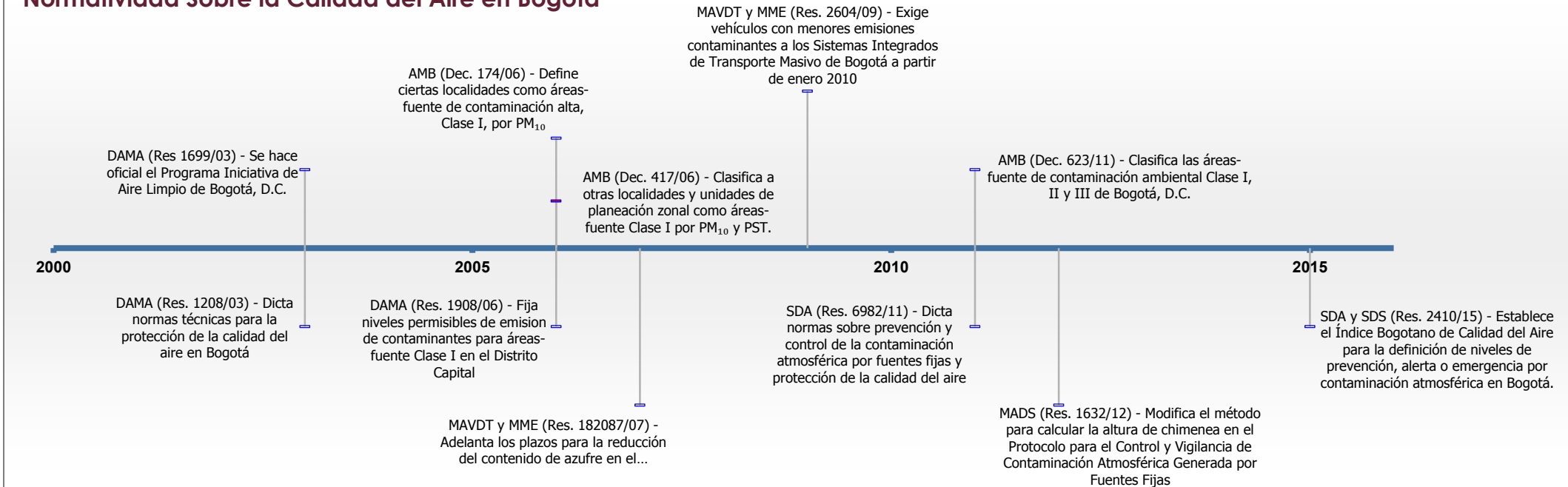
Cuadro 1. Normatividad Sobre la Calidad del Aire en Colombia hasta el año 2010

Normatividad Sobre la Calidad del Aire desde el año 2011



Cuadro 2. Normatividad Sobre la Calidad del Aire en Colombia desde el Año 2011 hasta el Año 2017

Normatividad Sobre la Calidad del Aire en Bogotá



Cuadro 3. Normatividad Sobre la Calidad del Aire en Bogotá

4.5 Marco Geográfico

CLIMA

Según, los estudios urbanos de la secretaría de hacienda, la ciudad de Bogotá se encuentra a 5°N del Ecuador, donde la temperatura promedio es de 13 grados centígrados a 15 grados centígrados. El régimen climático, está dado por una precipitación con distribución binomial, es decir, dos periodos con valores mínimos y dos con valores máximos de precipitación. Lo anterior, se debe a la ZCIT (Zona de Confluencia Intertropical), zona paralela al Ecuador, donde confluyen masas de aire que se desplazan con el movimiento aparente del sol. Teniendo en cuenta este fenómeno, en determinados períodos, cuando las áreas o territorios no se encuentran bajo la influencia de la ZCIT, presentan meses (aproximadamente tres meses) de buen tiempo o lo que se conoce como temporada seca, que se caracteriza por días soleados, con poca nubosidad. Así mismo, cuando países como Colombia se ven influenciados por la ZCIT, se evidencia la temporada húmeda, la cual se caracteriza por el aumento de la precipitación, días lluviosos y bajas temperaturas. En síntesis, el régimen binomial de precipitación debido a la ZCIT genera temporadas de tiempo húmedo o seco en el país de la siguiente manera: Períodos secos para los meses de diciembre, enero, febrero, junio, julio y agosto. Y períodos húmedos para los meses de marzo, abril, mayo, septiembre, octubre y noviembre. Se debe tener en cuenta que son aproximaciones que pueden variar o presentar anomalías, ya sea por variabilidad climática, como los fenómenos del Niño y la Niña o por el Cambio climático (Secretaría de Hacienda, 2013).

Con el fin de entender las variables que influyen en el clima de la ciudad de Bogotá, se presenta el siguiente estudio meteorológico:

Tabla 4. Estudio Meteorológico de Bogotá

| PARÁMETROS METEOROLÓGICOS | DESCRIPCIÓN |
|----------------------------------|---|
| PRECIPITACIÓN | La distribución anual de la precipitación en la ciudad (Histórico), presenta un comportamiento Bimodal con máximos en los meses de abril y octubre y mínimos en enero y julio. La distribución de la precipitación no es uniforme para toda la ciudad, esto se explica principalmente por la circulación de los vientos y por la topografía circundante a Bogotá. |
| VIENTOS EN SUPERFICIE | Durante los meses de febrero, junio, julio y agosto se registraron las velocidades promedias más altas y en enero, marzo, mayo y diciembre, las más bajas. En general la velocidad del viento se puede considerar como débil, con máximos en las horas del mediodía y mínimos en las primeras horas del día. |
| TEMPERATURA EN SUPERFICIE | El comportamiento de la temperatura media de la ciudad es similar en todos los meses del año, para cada una de las estaciones. Los valores máximos absolutos de la temperatura superaron los 25°C, especialmente en los meses de enero, febrero, marzo, abril, octubre, noviembre y diciembre, y la mínima absoluta registrada fue de 3.2 °C en el mes de enero. |
| INVERSIONES TÉRMICAS | Las Inversiones se producen cuando por encima de la superficie del terreno, la temperatura del aire aumenta con la altura. Las Inversiones se presentan generalmente durante la noche y primeras horas de la mañana, debido al calentamiento diurno y posterior enfriamiento de la superficie de la tierra. Generalmente las inversiones van acompañadas de velocidades débiles del viento, por lo tanto, representan períodos de tiempo donde está limitada la dispersión horizontal y vertical de los contaminantes. Las Inversiones Térmicas constituyen una condición limitante para la dispersión de los contaminantes, porque reducen el volumen efectivo de aire en que estos se emiten y posteriormente se diluyen. Los principales factores que influyen en la dispersión de los contaminantes son la velocidad y dirección horizontal del viento y la estructura vertical de la atmósfera (estabilidad atmosférica) |
| MICROCLIMAS | La combinación de los anteriores factores, (precipitación, vientos y temperatura), y si además se considera la extensión de la ciudad se puede decir que dentro de la misma área urbana la ciudad se presentan tres microclimas, uno Húmedo al norte de la ciudad, uno de transición al centro occidente de la ciudad y uno seco hacia el sur oriente de la ciudad. |

Nota: Tomado de Descripción de la Ciudad – clima (Secretaría de Hacienda, 2013)

Por otro lado, según la Alcaldía Mayor de Bogotá (2015), el clima de la ciudad se identifica por moderadamente frío, con una temperatura promedio de 14°C y en días soleados puede alcanzar e incluso sobrepasar los 23°C. La humedad relativa, se aproxima al 80% y especialmente en los meses de enero, febrero, julio y agosto se presentan condiciones secas. Generalmente entre los meses de marzo, mayo, septiembre y noviembre, se presentan intensas lluvias. Teniendo en cuenta que los

fenómenos del niño y la niña pueden generar que el clima sea impredecible y no siga los estándares o condiciones normales asociados a la ZCIT (zona de convergencia intertropical).

LOCALIDAD CANDELARIA

Universidad Libre - Sede Candelaria



La Candelaria es la localidad número 17 de la ciudad de Bogotá, cuenta con una extensión territorial de 181 hectáreas, está ubicada en el centro de la ciudad y limita, al norte, con la localidad de Los Mártires; al sur, con la localidad de San Cristóbal; al oriente, con la localidad de Santa Fe y al occidente, con las localidades de Los Mártires y Antonio Nariño. La Candelaria se ubica al borde de los Cerros Orientales, por lo que su territorio presenta una topografía inclinada (SDP, 2009).

Adicionalmente, la localidad no cuenta con zonas de tipo rural y, según el POT de Bogotá, su área es de actividad central y se destina a usos de vivienda, comercio, servicios y dotacionales (Cámara de Comercio, 2007) y su población es de 24.476 (Observatorio de Desarrollo Económico, 2015).

En La Candelaria se encuentran numerosas edificaciones que obstruyen el paso del viento, reduciendo su velocidad y modificando su dirección; esto, en combinación con la obstrucción del viento por parte de los Cerros Orientales, resulta en un aumento de la complejidad para que se dé la dispersión atmosférica (García Lozada, 2006).

La Universidad Libre – Sede Candelaria se encuentra sobre la calle octava entre las carreras sexta y quinta. Según la Agencia Inmobiliaria Virgilio Barco (2013) la carrera sexta es un corredor vial de ingreso de vehículos al centro de la ciudad en sentido Norte – Sur y la carrera quinta lo es en sentido Sur – Norte; además, la calle octava recibe parte del flujo vehicular en sentido Oriente – Occidente proveniente de la carrera séptima que mantiene un “flujo vehicular constante debido a que permite la comunicación entre las diferentes edificaciones institucionales que se encuentran en la localidad” (Agencia Mobiliaria Virgilio Barco, 2013).

5. METODOLOGÍA

Esta investigación es un estudio de tipo descriptivo en el que se determinará la calidad del aire ambiente en la zona aledaña a la Universidad Libre, Sede Candelaria respecto a la concentración de PM₁₀. Los objetivos específicos planteados corresponden respectivamente al desarrollo del modelo Fuente – Medio – Receptor, identificando las fuentes de emisión de material particulado en la zona de interés, determinando la concentración del contaminante en el medio y su contenido de minerales y finalmente la evaluación de los impactos del contaminante en la salud del receptor. Para cada objetivo la metodología fue la siguiente:

Tabla 5. Metodología

| Objetivo | Actividades | Meta | Resultado | Indicadores |
|---|--|---|---|---|
| 1. Estimar el aporte de las fuentes generadoras de material particulado a la concentración de PM ₁₀ en la zona de estudio. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Realizar aforo vehicular en lugar de muestreo elegido mediante filmación de la vía y conteo y determinación de variables físicas, por medio del software TRACKER (Behrentz, 2006). 2. Obtener distribución de fuentes. SDA Cl. 63 carta. 3. Realizar simulación en MOVES (EPA, 2014). 4. Generación de mapa de fuentes fijas y rutas de fuentes móviles. 5. Modelación por pluma gaussiana según Nevers (1999). | Concentración atribuible a fuentes móviles que transitan en la intersección de estudios | <ul style="list-style-type: none"> • Número de vehículos que transitan por la calle 8 y 6, cada hora entre las 7:00am a 6:00pm y su velocidad promedio. • Lista de fuentes fijas de contaminación atmosférica en la localidad candelaria monitoreadas por la secretaria distrital de ambiente. • Tasa de emisión de material particulado en kilogramos por hora en la intersección de estudio. • Distribución espacial de material particulado en Bogotá para las fechas de muestreo. • Concentración atribuible a fuentes móviles que transitan en la intersección de estudios. | <ul style="list-style-type: none"> • Base de datos en Excel con el número de vehículos por clase y su velocidad. • Reporte de la secretaría de ambiente con las fuentes fijas de emisión. • Tabla de reportes del programa MOVES. • Salida cartográfica de la distribución de material particulado en Bogotá para las fechas de muestreo. |

| Objetivo | Actividades | Meta | Resultado | Indicadores |
|---|---|---|--|--|
| 2. Establecer el cumplimiento de los niveles de PM ₁₀ en la zona de estudio, de acuerdo con la Res. 2254 del 2017. | <p>6. Pesar los filtros después del recolectar la muestra, de los 21 días de muestreo.</p> <p>7. Calcular, basados en la CFR -50 Apéndice j, las concentraciones de PM₁₀ de todos los días del muestreo.</p> <p>8. Realizar la Comparación de las concentraciones de PM₁₀ (24 horas) respecto a la resolución 2254 del 2017.</p> | Concentración de PM ₁₀ , para cada día de muestreo en la zona aledaña a la Universidad Libre sede Candelaria | <ul style="list-style-type: none"> • Obtener los pesos de PM₁₀, correspondientes a los días del muestreo. • Obtener la concentración PM₁₀, correspondientes a los días del muestreo. • Comparación de las concentraciones de PM₁₀ (24 horas) con respecto a la resolución 2254 del 2017. | <ul style="list-style-type: none"> • Base de datos en Excel con los pesos de los filtros en el día correspondiente. • Registro en Excel y análisis estadístico de los cálculos obtenidos de las concentraciones de PM₁₀, correspondientes a los días del muestreo. • Análisis de la comparación de las concentraciones de PM₁₀ (24 horas) con respecto a la resolución 2254 del 2017. |
| 3. Identificar los minerales presentes en el PM ₁₀ recolectado a través de la técnica de FTIR. | <p>9. Se realiza el blanco con el KBr en el FTIR.</p> <p>10 Se prepara la capsula de KBr con las muestras de PM₁₀, después se procede a ser analizada en el FTIR para obtener el espectro relacionado a cada día de muestreo.</p> <p>11. Se procede a hacer la comparación del espectro de las muestras con las frecuencias correspondientes a los minerales expuestos en la Tabla 2 y basados en la metodología de Senthil Kumar y Rajkumar, 2014</p> | Se espera un espectro infrarrojo con picos asociados a minerales contaminantes del aire. | <ul style="list-style-type: none"> • Obtener un espectro infrarrojo que demuestre la presencia de minerales contaminantes en el aire ambiente de Universidad Libre sede Candelaria. | <ul style="list-style-type: none"> • Tener espectros IR de caracterización del PM₁₀ para cada día de medición de material particulado. • Análisis químico cualitativo del espectro comparado con las frecuencias correspondientes a los minerales. |
| 4. Evaluar el riesgo a la salud de la población por los niveles y minerales presentes en el PM ₁₀ . | <p>12. Identificación de grupos de alto riesgo según edades de población.</p> <p>13. Análisis de la exposición según muestreo in situ.</p> <p>14. Cálculo de la dosis según concentración encontrada.</p> <p>15. Cálculo de muertes atribuibles a exposición a PM₁₀, según la metodología de Evaluación del Riesgo de la EPA (1992).</p> <p>16. Caracterización del riesgo según nivel límite de referencia.</p> | Número de muertes atribuibles a la exposición a material particulado de tamaño menor a 10 micras. | <ul style="list-style-type: none"> • Dosis de exposición en miligramos de PM por kilogramos de aire respirado por día. • Integración de los factores de la EPA para determinar la tasa de mortalidad durante el periodo de estudio. • Grupo de edad sujeto a mayor riesgo según comparación con límite de referencia. • Potenciales impactos a la salud de la población. | <ul style="list-style-type: none"> • Tabla de grupos de riesgo. • Registro en Excel de los cálculos de dosis y mortalidad. |

5.1 Estimación del aporte de las fuentes móviles de emisión de PM₁₀

Como se mencionó en la sección 4.3.2, MOVES utiliza información de entrada para definir las condiciones de la vía vehicular modelada y simular las emisiones del contaminante atmosférico de interés. Existen tres opciones de escala para la modelación: nacional, condado y proyecto; en este estudio se utilizó la opción Condado, modelando la vía de interés como un condado personalizado, la información requerida para esta opción y las fuentes de información recomendadas por la EPA se muestran en la Tabla 6 (EPA, 2010).

Tabla 6. Entradas para la escala Condado en MOVES

| Ítem | Descripción | Fuentes de información |
|--------------------------------------|---|--|
| <i>Condiciones meteorológicas</i> | Humedad y temperatura en la zona para cada hora que contenga la simulación | Estaciones meteorológicas cercanas, toma de datos in situ, promedios locales. |
| <i>Parqueo y arranque</i> | Porcentaje del tiempo que duran los vehículos en estados de inactividad, estacionamiento y arranque. | Aforos de entidades del sector transporte, aforo in situ. |
| <i>Volumen y velocidad vehicular</i> | Cantidad de vehículos por tipo que transitan por la vía modelada durante el tiempo especificado y porcentaje de vehículos que transitan en cada bin de velocidad (los bins de velocidad son rangos definidos por el programa, i.e.: Bin2→ 2,5 mph – 7,5 mph). | Aforos de entidades del sector transporte, aforo in situ. |
| <i>Combustibles y composición</i> | Son los tipos de combustible utilizados por los vehículos modelados y su composición química. | Fichas de calidad de proveedores de combustible locales, normatividad sobre estándares mínimos de calidad del combustible. |
| <i>Kilometraje</i> | Es el kilometraje promedio recorrido por cada tipo de vehículo. | Estudios de entidades del sector transporte. |
| <i>Edad vehicular</i> | El porcentaje de vehículos por tipo que pertenecen a cada rango de edad (desde 0 hasta más de 30 años) durante el año para el que se realiza el modelo. | Estudios de entidades del sector transporte, aforo in situ. |

Para comparar los resultados de la simulación de emisiones vehiculares con parámetros como las guías de calidad del aire de la OMS y la legislación colombiana, se requiere utilizar un modelo que procese la tasa de emisión encontrada y calcule la concentración del contaminante bajo unas condiciones definidas.

El modelo de celda fija considera a la zona modelada como una caja rectangular en la cual la entrada y salida de contaminantes se dan únicamente de manera paralela a la dirección predominante del viento, cuya velocidad es constante, teniendo una altura determinada a la cual el aire se encontrará completamente mezclado y siendo la concentración del contaminante (el cual es emitido a tasa constante) uniforme en todo el volumen de la caja (Nevers, 1998).

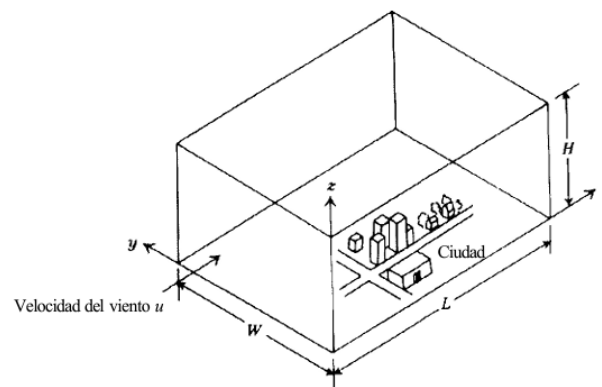


Imagen 1. Modelo de celda fija

Fuente: Ingeniería del control de la contaminación del aire, pág. 118, Nevers, 1998.

El modelo de la columna gaussiana de humo considera una pluma que se expande a medida que se aleja de su fuente de emisión, subiendo una distancia considerable debido a la temperatura a la que es emitida, y luego desplazándose mayormente en direcciones horizontales. La concentración se calcula en función de la estabilidad atmosférica, la velocidad del viento y la distancia del punto de interés al centro de la emisión (Organización Panamericana de la Salud, s.f).

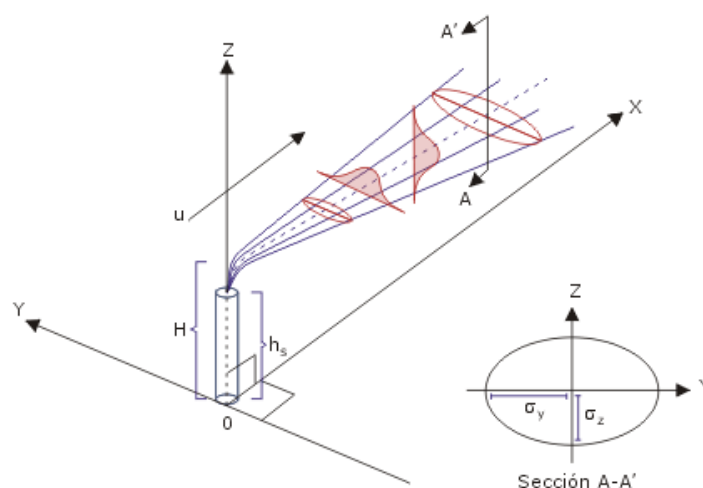
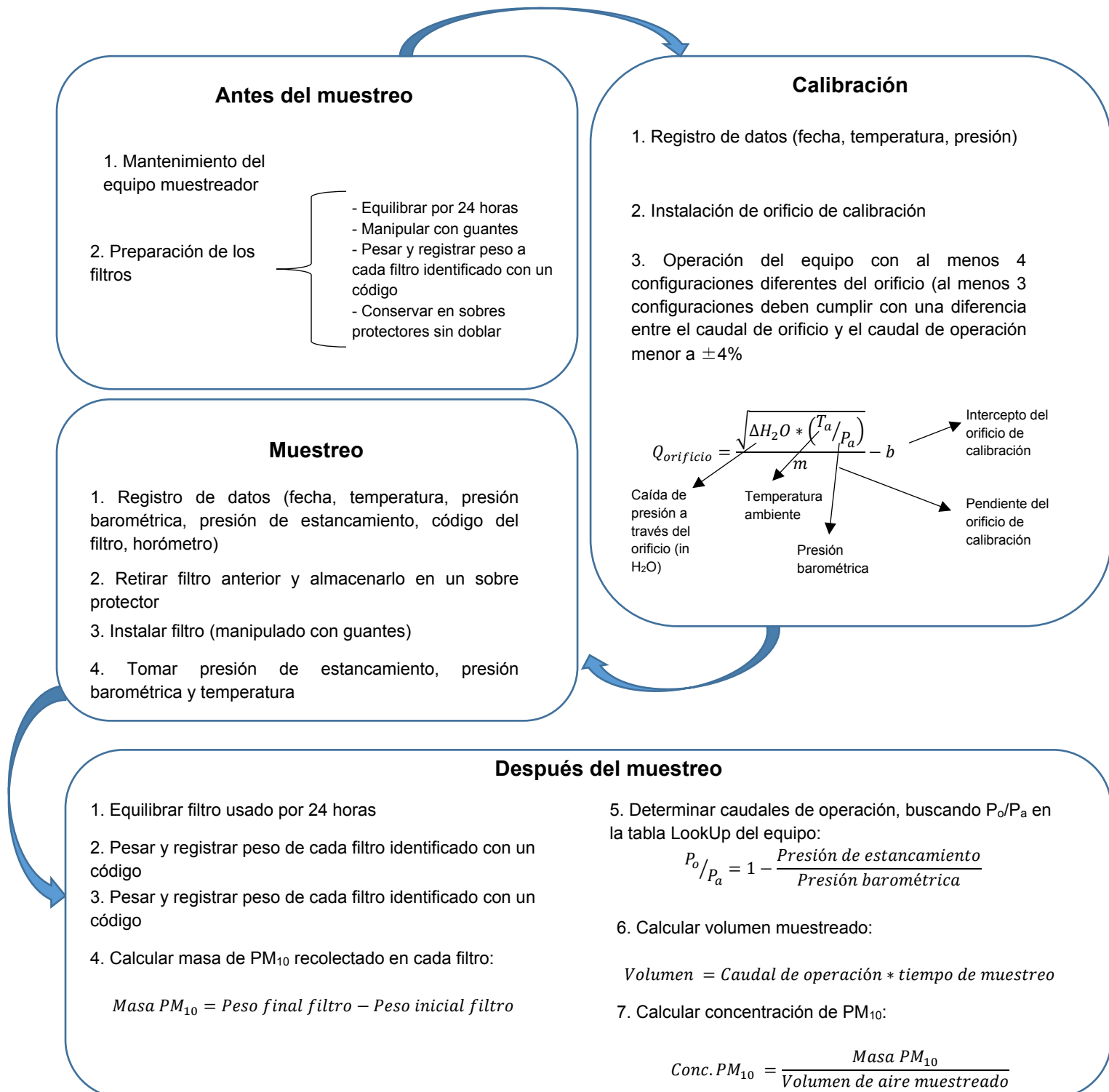


Imagen 2. Columna de humo gaussiana

Fuente: http://www.bvsde.paho.org/cursoa_meteoro/lecc6/lecc6_4.html

5.2 Determinación de la concentración promedio diaria de PM₁₀ en el aire ambiente de la zona

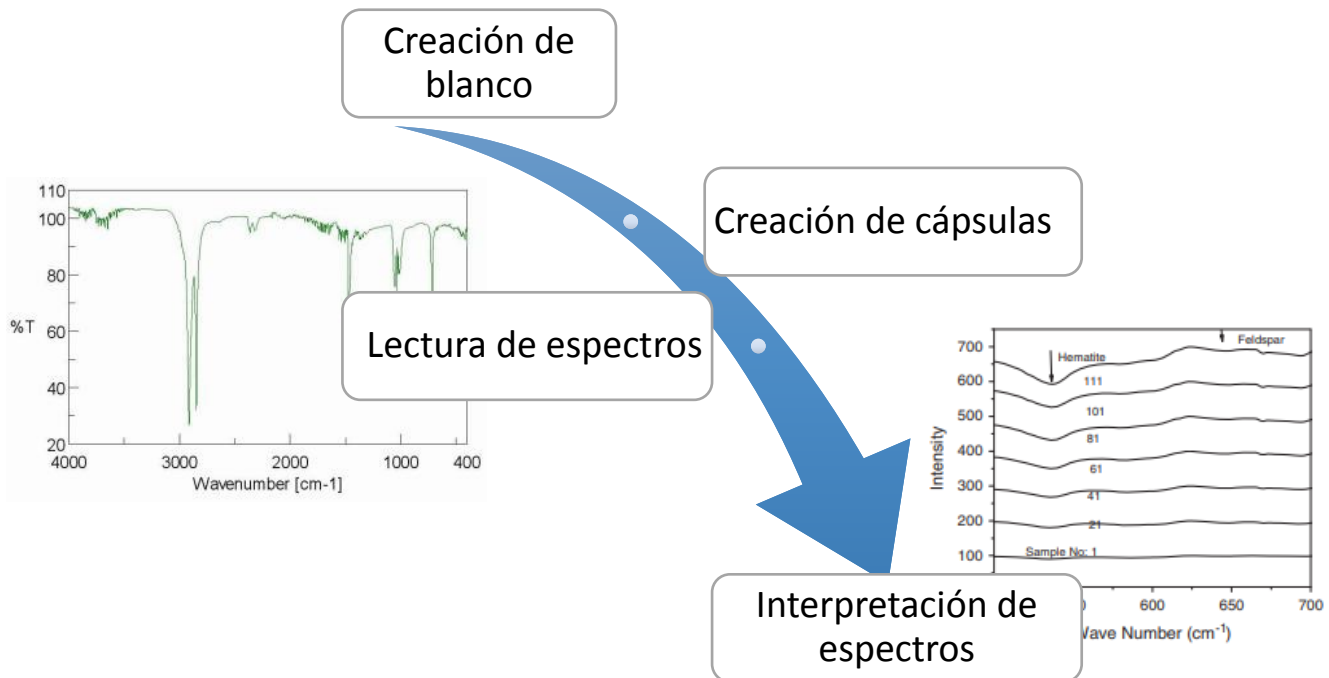
El Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire (MAVDT, 2010) establece los lineamientos para realizar el muestreo de PM₁₀ según el método de referencia CFR-App-J-Part 50-1997 utilizando un muestreador de alto volumen (Hi-Vol), en el Cuadro 4 se muestran los pasos a seguir:



Cuadro 4. Método Hi-Vol PM₁₀ (MAVDT, 2010)

5.3 Identificación de los minerales presentes en el PM₁₀ recolectado

La identificación de minerales en el material particulado consiste en los siguientes pasos:



Inicialmente se creó un blanco mezclando bromuro de potasio (KBr) con un poco de un filtro de cuarzo nuevo, generando un espectro de control, el cual será restado a los próximos espectros para corregir la lectura por la composición química de los filtros. Seguido de esto, se ensamblan las cápsulas mezclando KBr con un poco de material particulado, las cápsulas son introducidas al espectrómetro FTIR, el cual lee la intensidad de radiación infrarroja que atraviesa la muestra en relación con la intensidad leída sin muestra, generando un espectro de absorbancia o transmitancia contra longitud de onda. Finalmente, se identifican los picos y valles en los espectros asociados a grupos funcionales según teoría y espectros de referencia, determinando la presencia de los minerales de interés (Mohamed, Jaafar, Ismail, Othman, & Rahman, 2017).

5.4 Evaluación del riesgo: dosis-respuesta

La estructura básica de una evaluación de riesgo de un contaminante ambiental sobre la salud humana conlleva la identificación del contaminante en cuestión; la determinación de características del contaminante como fuentes de emisión, vías de ingreso al organismo y concentración promedio; estimación de los efectos que tendrá la exposición a este contaminante sobre la salud humana; y el análisis del riesgo con el fin de emitir un pronunciamiento sobre la gravedad de la exposición estudiada (García Lozada, 2006). Los objetivos primero, segundo y tercero del presente estudio abarcan los procesos de identificación del contaminante y determinación de sus características de interés.

Para realizar el análisis del riesgo de mortalidad atribuible a la exposición a PM₁₀ en la zona de estudio, se generaron funciones de dosis-respuesta (obtenidas a partir de curvas mortalidad vs concentración de PM₁₀) (Sánchez, Valdés , & Ostro, 1998) según el siguiente modelo:

$$NMA = m * [Cont] * TM * PE$$

Donde:

NMA = Número de Muertes Atribuibles a la Exposición al Contaminante

m = pendiente de la curva dosis – respuesta

[Cont] = Concentración del contaminante

TM = Tasa de mortalidad

PE = Población expuesta

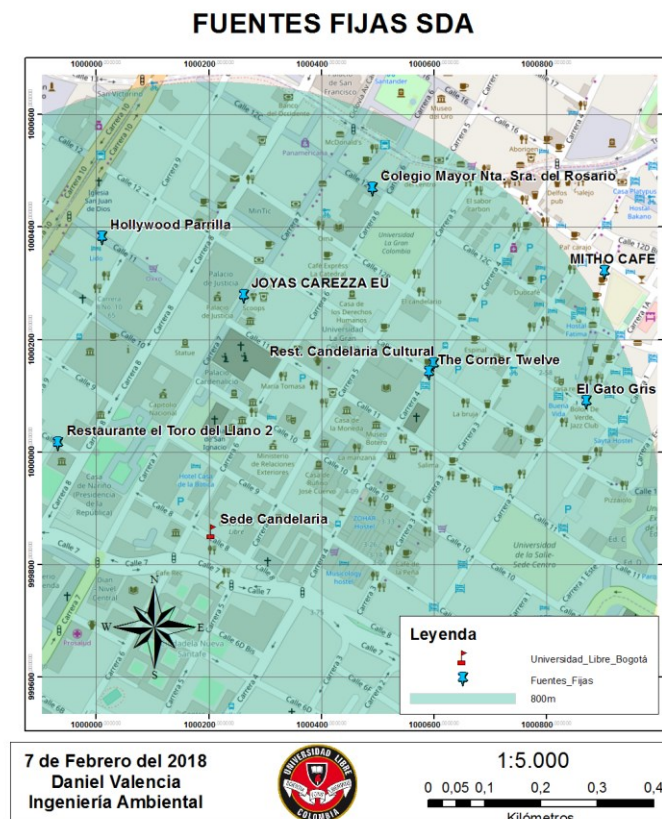
Finalmente, se realizó un análisis de las características del contaminante y contrastarlas con la normatividad vigente y lineamientos internacionales por medio del cálculo de la dosis para los diferentes grupos de respuesta y así generar una conclusión sobre el riesgo que representa el contaminante de interés a la salud de la población expuesta (EPA, 2014).

6. FUENTES DE EMISIÓN DE MATERIAL PARTICULADO EN LA ZONA

En La Candelaria, la mayor fuente de contaminación atmosférica y especialmente de material particulado es el tránsito vehicular, teniendo en cuenta que “el uso del suelo de la zona no es de uso industrial, ni tiene áreas por desarrollar, por lo anterior la contaminación por fuentes fijas es mínima” (Alcaldía Local de La Candelaria, 2013).

6.1 Fuentes Fijas

Con la información proporcionada por la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá, se generó la siguiente salida cartográfica (Mapa 2), en la cual es posible apreciar que únicamente se encuentran 7 fuentes fijas vigiladas por la SDA dentro de un rango de 800m a la redonda de la universidad, y todas estas fuentes corresponden a emisiones de tipo doméstico por uso de estufas a gas y a leña, siendo sus potenciales emisiones insignificantes en relación a las que se esperan encontrar para el tráfico vehicular en la zona de interés.



Mapa 2. Distribución de fuentes fijas monitoreadas por la SDA

6.2 Fuentes Móviles

Se utilizó el software MOVES (EPA, 2014) para estimar las emisiones de material particulado pertenecientes al flujo vehicular que se presenta en las vías inmediatas al lugar de estudio y en las vías aledañas. El programa requiere información de entrada relativa a la zona de interés, a continuación, se explicará cómo se obtuvo cada grupo de datos:

Edad vehicular: MOVES utiliza la edad del parque automotor para definir factores de emisión con base en la tecnología de control de emisiones registrada para cada modelo. Se tabuló la información obtenida del inventario de emisiones vehiculares de la Asociación Colombiana de Vehículos Automotores (ANDEMOS, 2017), y de tal manera se integraron los porcentajes de edad vehicular 48,8% de cero a diez años, 17,4% de once a veinte años y 14,8% mayores a veintiún años.

Velocidad promedio: La información sobre el flujo vehicular obtenida de la Agencia Inmobiliaria Virgilio Barco (2013) fue complementada con un aforo vehicular realizado el día 15 de marzo del 2017 sobre la intersección entre la carrera octava y la calle sexta por medio de filmación de la vía. El flujo vehicular fue determinado por conteo y se hallaron las velocidades promedio para los tipos de vehículo identificados por medio del software Tracker.

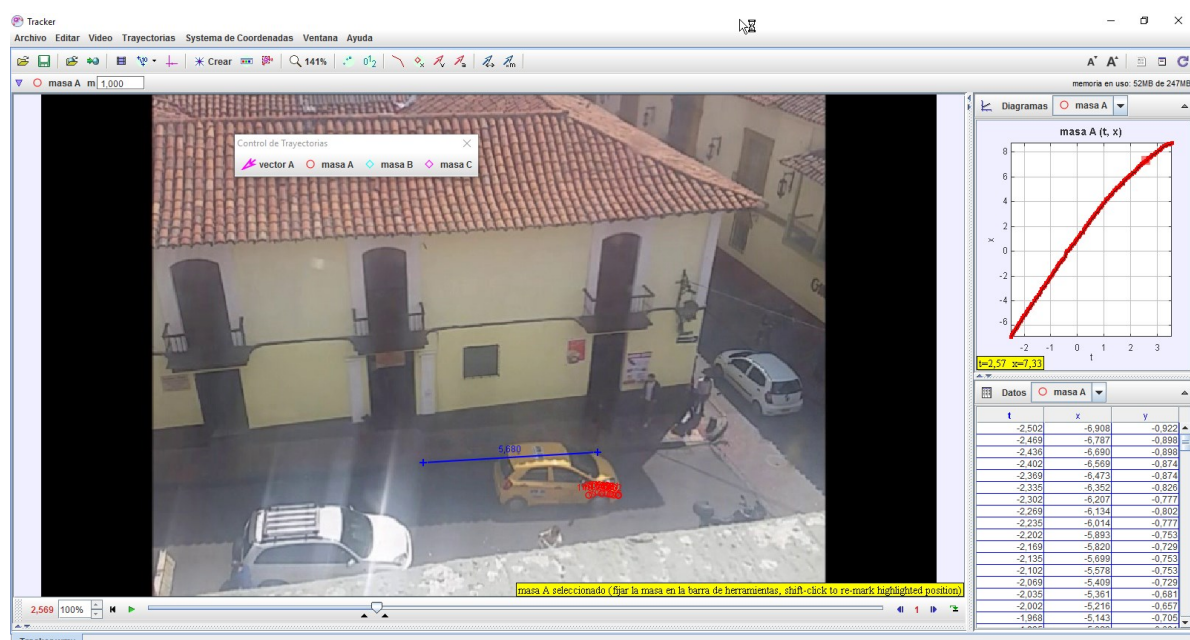
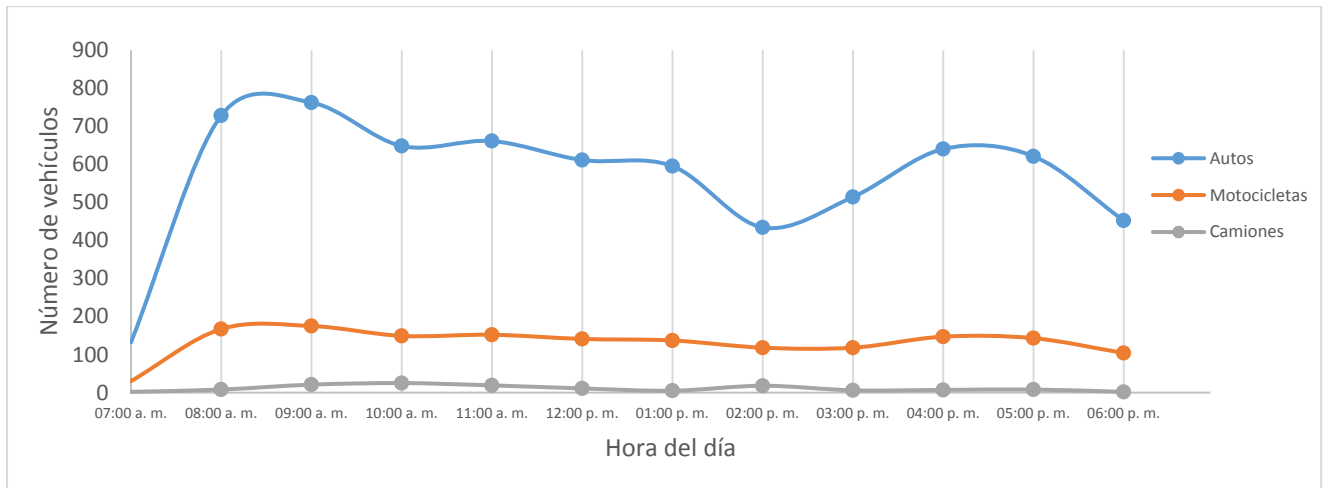


Imagen 3. Procesamiento de la información en el software Tracker.

Flujo vehicular: Producto del conteo se obtuvo el Cuadro 5, en la cual se puede apreciar que el momento de mayor tráfico vehicular se da entre las 8:00 a.m. y las 9:00 a.m. y que se tiene un promedio horario aproximado de 567 automóviles, 132 motocicletas y 11 camiones.



Cuadro 5. Flujo vehicular en la intersección Cl. 8va x Cra. 6ta

Composición del combustible: La simulación se realizó teniendo en cuenta que los vehículos que transitan por la zona de estudio operan con combustibles diésel y gasolina. La composición química de estos combustibles fue obtenida de los estándares mínimos de calidad estipulados en la resolución 1180 del 2006 para la gasolina y la resolución 90963 del 2014 para el diésel.

Condiciones meteorológicas: Durante el mes de marzo del año 2018 se instaló una estación meteorológica DAVIS en el lugar de muestreo, de la cual se extrajeron los datos promedio horarios requeridos de temperatura y humedad relativa.

Millas de viaje vehicular: Se obtuvieron los factores de actividad vehicular del modelo de emisiones vehiculares de Herrera Montañez (2007) y se procesaron en el convertidor de factores de actividad vehicular anual de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (2014).

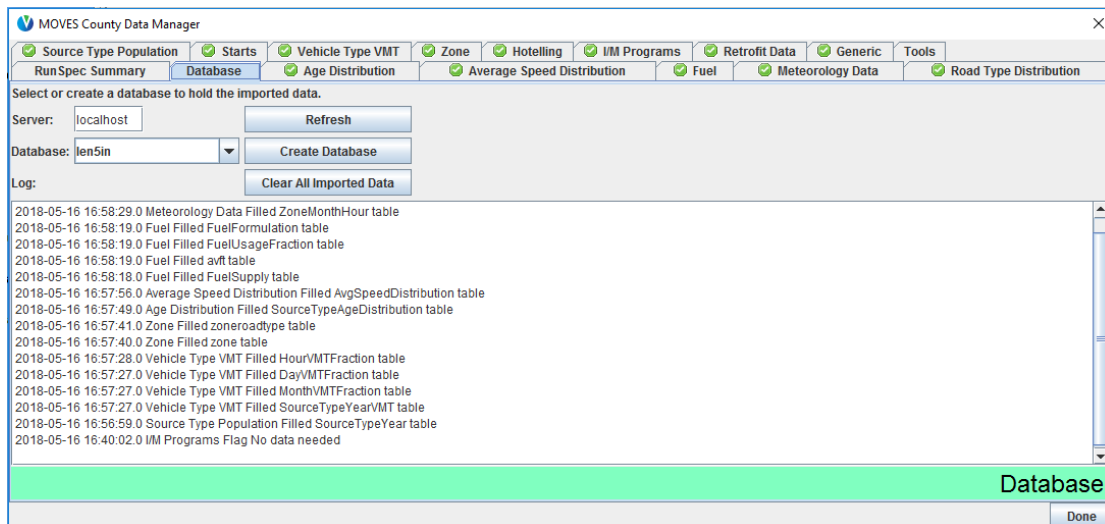


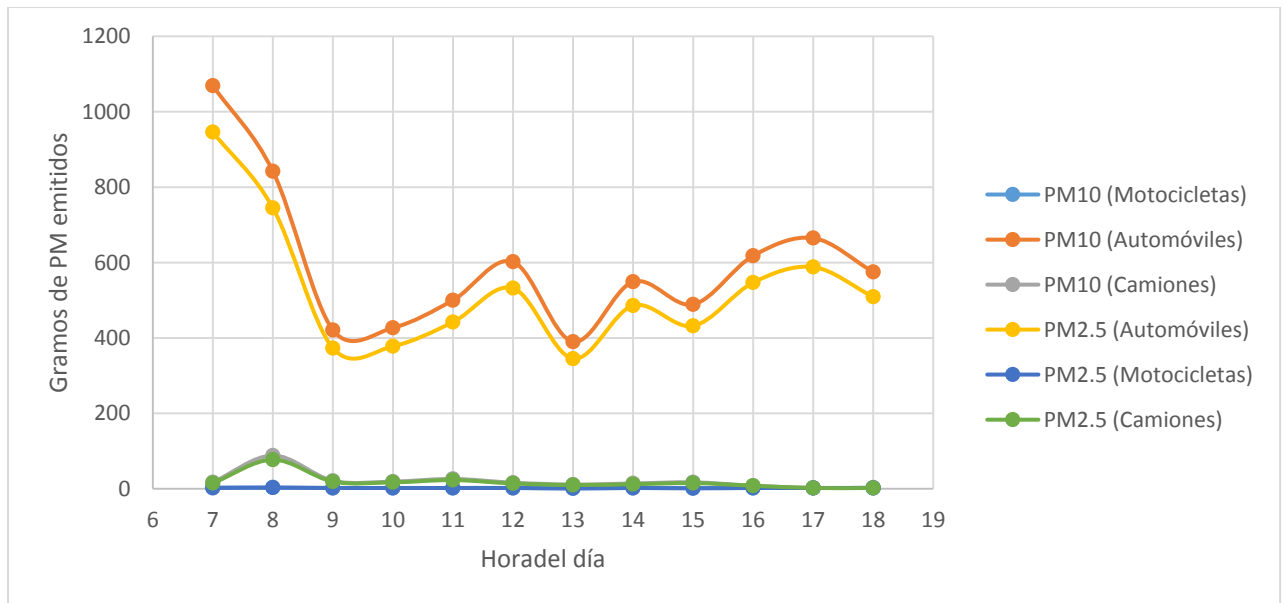
Imagen 4. Base de datos locales de MOVES

La simulación se realizó en la escala condado (county) con límites geográficos personalizados (custom domain) para reflejar las condiciones de las vías de interés. Tras seleccionar PM_{10} y $PM_{2.5}$ como contaminantes a simular, se procedió a alimentar la base de datos (Imagen 4) con la información de entrada ya mencionada. Posteriormente, se ejecutó la simulación horaria para modelo de vehículo, tipo de combustible, tipo de vehículo y proceso de emisión (Imagen 5) con unidades de reporte en gramos, joules y kilómetros (Imagen 6).

Imagen 5. Parámetros de simulación MOVES

Imagen 6. Unidades de reporte MOVES

Finalmente, como se puede apreciar en el Cuadro 6, la simulación reporta que el mayor aporte a las concentraciones de material particulado proviene de la operación de vehículos particulares a cuatro ruedas, siendo la mayor emisión de 1069 gramos de PM_{10} por hora.



Cuadro 6. Emisiones de PM₁₀ provenientes de fuentes móviles

6.3 Modelo de dispersión

Para realizar un análisis apropiado de los resultados de la simulación de emisiones vehiculares, es necesario integrarlos a un modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos con el fin de contrastar su efecto en la concentración ambiente de material particulado contra la normatividad vigente y los estándares de exposición de la Organización Mundial de la Salud. Así entonces, se utilizó el modelo de dispersión de pluma gaussiana en el que se considera la emisión como una columna de humo dentro de la cual la concentración del contaminante disminuye proporcionalmente a la distancia desde el punto de liberación. El modelo aplica la Ecuación 1 (Nevers, 1998), para la cual se determinan coeficientes de dispersión vertical y horizontal según la clasificación de la atmósfera local.

Ecuación 1. Concentración de un contaminante, pluma gaussiana

$$c = \frac{Q}{2\pi * u\sigma_y\sigma_z} \left[-\left(\frac{y^2}{2\sigma_y^2} + \frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2} \right) \right]$$

donde:

c = concentración del contaminante ($\mu g/m^3$)

Q = Tasa de emisión (g/s)

u = Velocidad promedio del viento (m/s)

σ_y = coeficiente de dispersión horizontal (m)

σ_z = coeficiente de dispersión vertical (m)

y = dist. horizontal desde la emisión (m)

z = altura de interés (msns)

H = altura efectiva de la emisión (msns)

La atmósfera se clasifica de acuerdo con su estabilidad en 6 niveles: A, B, C, D, E y F, siendo A la clase menos estable y F la clase con mejores condiciones para la concentración de contaminantes a nivel del suelo. Con las condiciones locales de radiación solar moderada y velocidad del viento promedio entre 3 m/s y 5 m/s, se encuentra una atmósfera de clase C, con coeficientes de dispersión de 15 m y 8 m. De tal manera, se encontró que con una tasa de emisión promedio de 596 g PM₁₀/hora a una altura efectiva de 3,5 m, la concentración del contaminante a una altura de 1,6 m sobre el sendero peatonal y una atmósfera de clase C será de 71 µg PM₁₀/m³, y, a la misma altura y una distancia de 10 m del punto de la emisión, será de 56,98 µg/m³.

Al aumentar la altura en este modelo, las concentraciones obtenidas (hasta 4 µg/m³) difieren significativamente de la obtenida durante el muestreo de PM₁₀ en el capítulo 7, por lo que también se utilizó el modelo de celda fija, el cual asume que la emisión se ve confinada dentro de límites definidos (considerando a las altas edificaciones cercanas como barreras) y que el contaminante no entra ni sale por la parte superior o por ningún lado que no sea paralelo a la dirección del viento, utilizando la siguiente ecuación:

Ecuación 2. Concentración de un contaminante, celda fija

$$c = b + \frac{qL}{uH}$$

donde:

c = concentración del contaminante (µg/m³) W = Long. dir. perpendicular al viento (m)

b = Concentración de fondo (µg/m³) u = Velocidad promedio del viento (m/s)

H = Altura de mezclado (m) L = longitud de dir. paralela al viento (m)

q = Emisiones por área = $\frac{\text{Tasa de Emisión}}{L * W} \left(\frac{\mu g}{s * m^2} \right)$

Considerando una concentración de fondo de 0 µg/m³, con una velocidad del viento de 3 m/s, una altura de mezclado de 200 m, $L = 111$ m, $W = 9$ m y Tasa de Emisión de 596 g PM₁₀/hora, se obtuvo una concentración homogénea de 31 µg/m³.

Con la excepción de la concentración a 1,6 m sobre el sendero peatonal, los resultados cumplen con el límite máximo permisible de concentración promedio diaria de $75 \mu\text{g PM}_{10}/\text{m}^3$ establecido por la Resolución 2254 del 2017, las concentraciones obtenidas por medio del modelo de pluma gaussiana se encuentran entre el rango Aceptable del índice de calidad del aire, y la concentración obtenida por medio del modelo de celda fija se encuentra en el rango 'Bueno' del índice de calidad del aire (MADS, 2017) y únicamente esta última concentración cumple con el límite de $50 \mu\text{g PM}_{10}/\text{m}^3$ al día de las guías de calidad del aire de la OMS (Organización Mundial de la Salud, 2005).

7. DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE PM₁₀

Se ejecutó un muestreo de material particulado por 18 días para determinar la concentración promedio diaria del contaminante y analizar su comportamiento con relación a factores como humedad relativa y velocidad del viento.

7.1 Lugar de muestreo

Se examinó el lugar de estudio y se determinó que el lugar más adecuado para realizar el muestreo es la terraza ubicada en el edificio donde se encuentra la entrada de la Universidad Libre Sede Candelaria (Imagen 7).



Imagen 7. Edificio entrada Universidad Libre Sede Candelaria

Basados en la información recopilada (Cuadro 7) y observada, es el único lugar que no cuenta con teja tipo español y no está rodeado por edificaciones en el cual se puede garantizar la seguridad de los equipos y que, con las autorizaciones pertinentes, los autores del proyecto cuentan con un acceso a la zona de instalación. Además, ya que los equipos se hallarán en un edificio dentro de la universidad, se puede contar con la seguridad privada, por lo cual no serán susceptibles a robo. Igualmente, al ubicar los equipos allí, no serán ofensivos visualmente para el público. Aunque se debe tener en cuenta que se debe adaptar el lugar para conectar los equipos a una red eléctrica, y que la distancia del edificio al árbol más cercano es de 4 y 8 metros y su altura de aproximadamente 22 metros,

lo cual está incumpliendo con lo dicho en el protocolo de monitoreo y vigilancia de la calidad de aire (MAVDT, 2010).

| FICHA TÉCNICA ESTACIONES DE MONITOREO | | | |
|--|--|---|--|
| INFORMACIÓN GENERAL | | | |
| NOMBRE DE LA ESTACIÓN | Universidad Libre sede candelaria | RED | N.A. |
| NOMBRE CORTO | U LIBRE CANDELARIA | NÚMERO | 1 |
| UBICACIÓN | <div>LATITUD</div> <div>LONGITUD</div> | <div>4° 35.701'N</div> <div>74° 4.538'O</div> | <div>ALTITUD</div> <div>ALT. DEL SUELO</div> |
| | | | <div>2654</div> <div>22m</div> |
| ENTORNO LOCAL | Urbano | | |
| TIPO DE ESTACIÓN | | | |
| Nivel I: ÁREA dominantes | | Nivel II: Tiempo | |
| Urbana | <input checked="" type="checkbox"/> | Fija | <input type="checkbox"/> |
| Suburbana | <input type="checkbox"/> | Indicativa | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Rural | <input type="checkbox"/> | | |
| | | Nivel III: Emisiones | |
| | | Tráfico | <input checked="" type="checkbox"/> |
| | | Punto Critico | <input type="checkbox"/> |
| | | Industrial | <input type="checkbox"/> |
| | | De Fondo | <input type="checkbox"/> |
| TRÁFICO | | CONDICIONES | |
| Distancia al borde (m) | 13m | Seguridad | Acceptable |
| Ancho de la vía | 4 m | Logística | Adaptar |
| Tráfico Diario Sentido 1 | 8511 | Visuales | Ninguna |
| Tráfico Diario Sentido 2 | N.A. | | |
| Velocidad Promedio | 5 km/h | | |
| % de Vehículos Pesados | 1,6% | DISTANCIAS | |
| Estado de la Vía | Bueno | Árboles más Cercanos | 9 m |
| | | Altura de Árboles | Aprox. 3M |
| | | | |
| INDICATIVAS | | RURALES DE FONDO | |
| Tiempo de Muestreo | 18 días | Cercanas a Ciudades | <input type="checkbox"/> |
| Seco/Húmedo | Seco y húmedo | Regionales | <input type="checkbox"/> |
| Fecha Inicio | 02/03/2018 | | |
| OBJETIVOS REPRESENTATIVIDAD DE LA ESTACIÓN | | | |
| Evaluar el riesgo para la salud humana | | | |
| Determinar el cumplimiento de las normas de calidad del aire | | | |
| REPRESENTATIVIDAD | | | |
| | | | |
| FUENTES DE EMISIÓN | | | |
| Principal Fuente | Tráfico | | |
| Segunda Fuente | | | |
| Tercera Fuente | | | |
| CONFIGURACIÓN DE LA ESTACIÓN | | | |
| PARÁMETRO | TECNOLOGÍA | MÉTODO DE REFERENCIA | METEOROLOGÍA |
| MP10 | X | Manual MP | DV |
| MP2.5 | | | VV. |
| PST | | | PRESIÓN |
| CO | | | TEMP. |
| SO2 | | | HR |
| NOx | | | PRECIP. |
| O3 | | | RAD. SOL. |
| OTRO | | | OTROS |

Cuadro 7. Ficha técnica de estaciones de monitoreo

7.2 Acondicionamiento y pesado de filtros

Se utilizaron 18 filtros de cuarzo, que inicialmente fueron llevados a condiciones de equilibrio durante 24 horas, tras lo cual fueron pesados y guardados en bolsas ziploc, las cuales a su vez fueron guardadas en sobres de manila.



Imagen 8. Acondicionamiento de filtros



Imagen 9. Pesaje inicial

Después de cada día de muestreo, los filtros eran recolectados y transportados en bolsas ziploc y sobres de manila al laboratorio, en donde, tras alcanzar las condiciones de equilibrio, se tomaba y registraba su peso final.

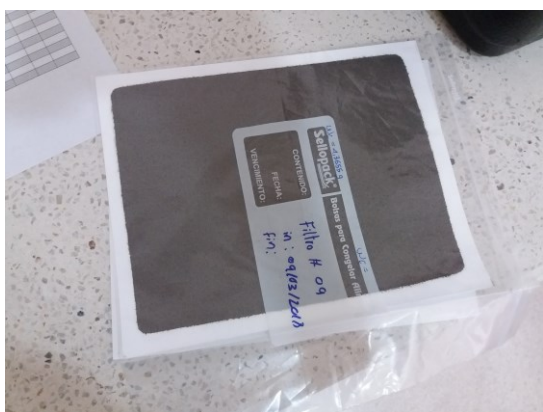


Imagen 10. Transporte de los filtros



Imagen 11. Pesaje final

7.3 Muestreo

Se tomaron muestras de material particulado y se capturó información meteorológica haciendo uso de un muestreador de aire de alto volumen y una

estación meteorológica, respectivamente, en la Universidad Libre – Sede Candelaria, desde el día 2 de marzo del 2018 hasta el 20 de marzo del 2018.



Imagen 12. Instalación de equipo Hi-Vol y Estación DAVIS

Se efectuó la calibración del equipo muestreador de alto volumen Hi-Vol de acuerdo al Protocolo de Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire (MAVDT, 2010) al momento de la instalación, pasadas 360 horas de muestreo, y al final del muestreo (Imagen 13); se obtuvieron 3 de 5 puntos de cumplimiento en las dos primeras calibraciones y 2 puntos en la calibración final. Los datos de cada día fueron registrados en un formato de campo y luego transcritos a una hoja de cálculo en Excel.



Imagen 13. Calibración del equipo Hi-Vol

| Fecha | | | | Datos meteorológicos | | | | | | | | | | | | |
|-------|-----|-----|------|----------------------|-----------------|------------------|-------------|---------------|-----------------|------------------|-------------|---------------|-----------------|------------------|-------------|---------------|
| Ord. | Di. | Me. | Año | Hora | Velocidad (m/s) | Temperatura (°C) | Humedad (%) | Presión (hPa) | Velocidad (m/s) | Temperatura (°C) | Humedad (%) | Presión (hPa) | Velocidad (m/s) | Temperatura (°C) | Humedad (%) | Presión (hPa) |
| 02 | 02 | 02 | 1923 | 12:00 | 22.7 | 75.6 | 17 | | | | | | | | | |
| 03 | 03 | 03 | 1923 | 12:00 | 22.7 | 75.9 | 17 | | | | | | | | | |
| 04 | 04 | 04 | 1923 | 12:00 | 22.8 | 75.9 | 17 | | | | | | | | | |
| 05 | 05 | 05 | 1923 | 12:00 | 22.9 | 76.1 | 17 | | | | | | | | | |
| 06 | 06 | 06 | 1923 | 12:00 | 18.6 | 74.6 | 15 | | | | | | | | | |
| 07 | 07 | 07 | 1923 | 12:00 | 22.7 | 75.5 | 16 | | | | | | | | | |
| 08 | 08 | 08 | 1923 | 12:00 | 20.4 | 75.8 | 16 | | | | | | | | | |
| 09 | 09 | 09 | 1923 | 12:00 | 22.6 | 76.0 | 14 | | | | | | | | | |
| 10 | 10 | 10 | 1923 | 12:00 | 22.9 | 75.9 | 18 | | | | | | | | | |
| 11 | 11 | 11 | 1923 | 12:00 | 23.2 | 75.5 | 18 | | | | | | | | | |
| 12 | 12 | 12 | 1923 | 12:00 | 23.3 | 75.9 | 20 | | | | | | | | | |
| 13 | 13 | 13 | 1923 | 12:00 | 23.4 | 75.9 | 20 | | | | | | | | | |
| 14 | 14 | 14 | 1923 | 12:00 | 18.8 | 75.6 | 22 | | | | | | | | | |
| 15 | 15 | 15 | 1923 | 12:00 | 19.2 | 75.6 | 18 | | | | | | | | | |
| 16 | 16 | 16 | 1923 | 12:00 | 19.8 | 75.8 | 22 | | | | | | | | | |
| 17 | 17 | 17 | 1923 | 12:00 | 19.6 | 75.6 | 18 | | | | | | | | | |
| 18 | 18 | 18 | 1923 | 12:00 | 19.3 | 75.6 | 18 | | | | | | | | | |
| 19 | 19 | 19 | 1923 | 12:00 | | | | | | | | | | | | |
| 20 | 20 | 20 | 1923 | 12:00 | | | | | | | | | | | | |
| 21 | 21 | 21 | 1923 | 12:00 | | | | | | | | | | | | |
| 22 | 22 | 22 | 1923 | 12:00 | | | | | | | | | | | | |
| 23 | 23 | 23 | 1923 | 12:00 | | | | | | | | | | | | |
| 24 | 24 | 24 | 1923 | 12:00 | | | | | | | | | | | | |
| 25 | 25 | 25 | 1923 | 12:00 | | | | | | | | | | | | |
| 26 | 26 | 26 | 1923 | 12:00 | | | | | | | | | | | | |
| 27 | 27 | 27 | 1923 | 12:00 | | | | | | | | | | | | |
| 28 | 28 | 28 | 1923 | 12:00 | | | | | | | | | | | | |
| 29 | 29 | 29 | 1923 | 12:00 | | | | | | | | | | | | |
| 30 | 30 | 30 | 1923 | 12:00 | | | | | | | | | | | | |
| 31 | 31 | 31 | 1923 | 12:00 | | | | | | | | | | | | |
| 01 | 01 | 01 | 1924 | 12:00 | | | | | | | | | | | | |
| 02 | 02 | 02 | 1924 | 12:00 | | | | | | | | | | | | |
| 03 | 03 | 03 | 1924 | 12:00 | | | | | | | | | | | | |
| 04 | 04 | 04 | 1924 | 12:00 | | | | | | | | | | | | |
| 05 | 05 | 05 | 1924 | 12:00 | | | | | | | | | | | | |
| 06 | 06 | 06 | 1924 | 12:00 | | | | | | | | | | | | |
| 07 | 07 | 07 | 1924 | 12:00 | | | | | | | | | | | | |
| 08 | 08 | 08 | 1924 | 12:00 | | | | | | | | | | | | |
| 09 | 09 | 09 | 1924 | 12:00 | | | | | | | | | | | | |
| 10 | 10 | 10 | 1924 | 12:00 | | | | | | | | | | | | |
| 11 | 11 | 11 | 1924 | 12:00 | | | | | | | | | | | | |
| 12 | 12 | 12 | 1924 | 12:00 | | | | | | | | | | | | |
| 13 | 13 | 13 | 1924 | 12:00 | | | | | | | | | | | | |
| 14 | 14 | 14 | 1924 | 12:00 | | | | | | | | | | | | |
| 15 | 15 | 15 | 1924 | 12:00 | | | | | | | | | | | | |
| 16 | 16 | 16 | 1924 | 12:00 | | | | | | | | | | | | |
| 17 | 17 | 17 | 1924 | 12:00 | | | | | | | | | | | | |
| 18 | 18 | 18 | 1924 | 12:00 | | | | | | | | | | | | |
| 19 | 19 | 19 | 1924 | 12:00 | | | | | | | | | | | | |
| 20 | 20 | 20 | 1924 | 12:00 | | | | | | | | | | | | |
| 21 | 21 | 21 | 1924 | 12:00 | | | | | | | | | | | | |
| 22 | 22 | 22 | 1924 | 12:00 | | | | | | | | | | | | |
| 23 | 23 | 23 | 1924 | 12:00 | | | | | | | | | | | | |
| 24 | 24 | 24 | 1924 | 12:00 | | | | | | | | | | | | |
| 25 | 25 | 25 | 1924 | 12:00 | | | | | | | | | | | | |
| 26 | 26 | 26 | 1924 | 12:00 | | | | | | | | | | | | |
| 27 | 27 | 27 | 1924 | 12:00 | | | | | | | | | | | | |
| 28 | 28 | 28 | 1924 | 12:00 | | | | | | | | | | | | |
| 29 | 29 | 29 | 1924 | 12:00 | | | | | | | | | | | | |
| 30 | 30 | 30 | 1924 | 12:00 | | | | | | | | | | | | |
| 31 | 31 | 31 | 1924 | 12:00 | | | | | | | | | | | | |

7.4 Cálculo de la concentración

Las muestras fueron transportadas al laboratorio en bolsas ziploc y sobres de manila, una vez pesados, se registraba la información pertinente en el formato dispuesto.

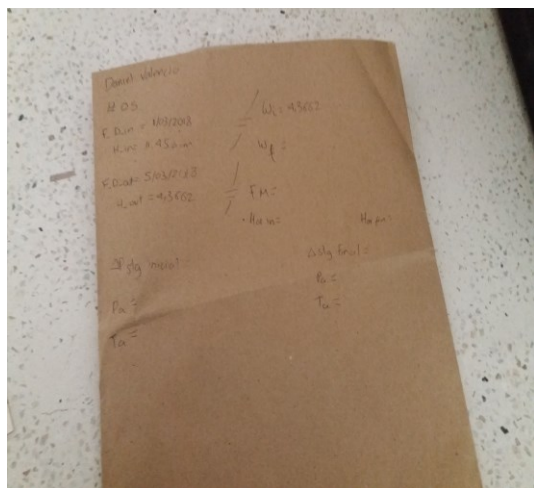


Imagen 16. Preservación de los filtros

| # | Código del Filtro | Inicio Equilibrio Pre-muestra | | | Final Equilibrio Pre-muestra | | | Peso inicial (g) | Fecha de muestreo | Inicio Equilibrio Post-muestra | | | Final Equilibrio Post-muestra | | | Peso final (g) |
|----|-------------------|-------------------------------|------|-------|------------------------------|------|-------|------------------|-------------------|--------------------------------|-------|-------|-------------------------------|------|-------|----------------|
| | | Día | Hora | hora | Día | Hora | hora | | | Día | Hora | hora | Día | Hora | hora | |
| 1 | 02 | 28 | 02 | 10:05 | 1 | 03 | 11:35 | 4.3766 | 02/03/18 | 7 | 03 | 09:51 | 9 | 03 | 2.31 | 4.4285 |
| 2 | 03 | 28 | 02 | 12:45 | 1 | 03 | 11:35 | 4.3679 | 1/03/18 | 7 | 03 | 09:51 | 9 | 03 | 2.31 | 4.4174 |
| 3 | 04 | 1 | 03 | 11:45 | 5 | 03 | 11:40 | 4.3638 | 4/03/18 | 03 | 10 | 13:12 | 05 | 10 | 10:09 | 4.4238 |
| 4 | 05 | 1 | 03 | 11:45 | 5 | 03 | 11:40 | 4.3652 | 5/03/18 | 7 | 03 | 11:41 | 12 | 03 | 10:09 | 4.3992 |
| 5 | 06 | 1 | 03 | 11:45 | 5 | 03 | 11:40 | 4.3657 | 7/03/18 | 7 | 03 | 11:41 | 12 | 03 | 10:09 | 4.3791 |
| 6 | 07 | 1 | 03 | 11:45 | 5 | 03 | 11:40 | 4.3604 | 2/03/18 | 8 | 03 | 15:34 | 15 | 03 | 16:00 | 4.3825 |
| 7 | 08 | 1 | 03 | 11:45 | 5 | 03 | 11:40 | 4.3645 | 4/03/18 | 9 | 03 | 15:34 | 15 | 03 | 16:00 | 4.3633 |
| 8 | 09 | 03 | 03 | 3:40 | 8 | 03 | 15:40 | 4.3665 | 3/03/18 | 12 | 03 | 15:42 | 15 | 03 | 16:00 | 4.3850 |
| 9 | 10 | 03 | 03 | 3:40 | 8 | 03 | 15:40 | 4.3706 | 11/03/18 | 15 | 03 | 10:30 | | | | |
| 10 | 11 | 03 | 03 | 3:40 | 8 | 03 | 15:40 | 4.3768 | 21/03/18 | 15 | 03 | 10:30 | | | | |
| 11 | 12 | 2 | 03 | 15:30 | 12 | 03 | 15:50 | 4.3755 | 16/03/18 | 15 | 03 | 10:30 | | | | |
| 12 | 13 | 2 | 03 | 15:30 | 12 | 03 | 15:50 | 4.3857 | 14/03/18 | 15 | 03 | 15:54 | | | | |
| 13 | 14 | 12 | 03 | 9:55 | 15 | 03 | 10:15 | 4.3902 | 15/03/18 | 20 | 03 | 10:35 | | | | |
| 14 | 15 | 12 | 03 | 9:55 | 15 | 03 | 10:15 | 4.3912 | 16/03/18 | 20 | 03 | 10:35 | | | | |
| 15 | 16 | 12 | 03 | 9:55 | 15 | 03 | 10:15 | 4.2112 | 15/03/18 | 20 | 03 | 10:35 | | | | |
| 16 | 17 | 12 | 03 | 9:55 | 15 | 03 | 15:32 | 4.2485 | 3/03/18 | 20 | 03 | 10:35 | | | | |
| 17 | 18 | 12 | 03 | 9:55 | 15 | 03 | 15:32 | 4.2620 | 9/03/18 | 20 | 03 | 10:35 | | | | |
| 18 | 19 | 12 | 03 | 9:55 | 15 | 03 | 15:32 | 4.2600 | 19/03/18 | 20 | 03 | 10:35 | | | | |
| 19 | 19 | 12 | 03 | 9:55 | 15 | 03 | 15:32 | 4.2734 | 21 | 03 | 17:25 | | | | | |

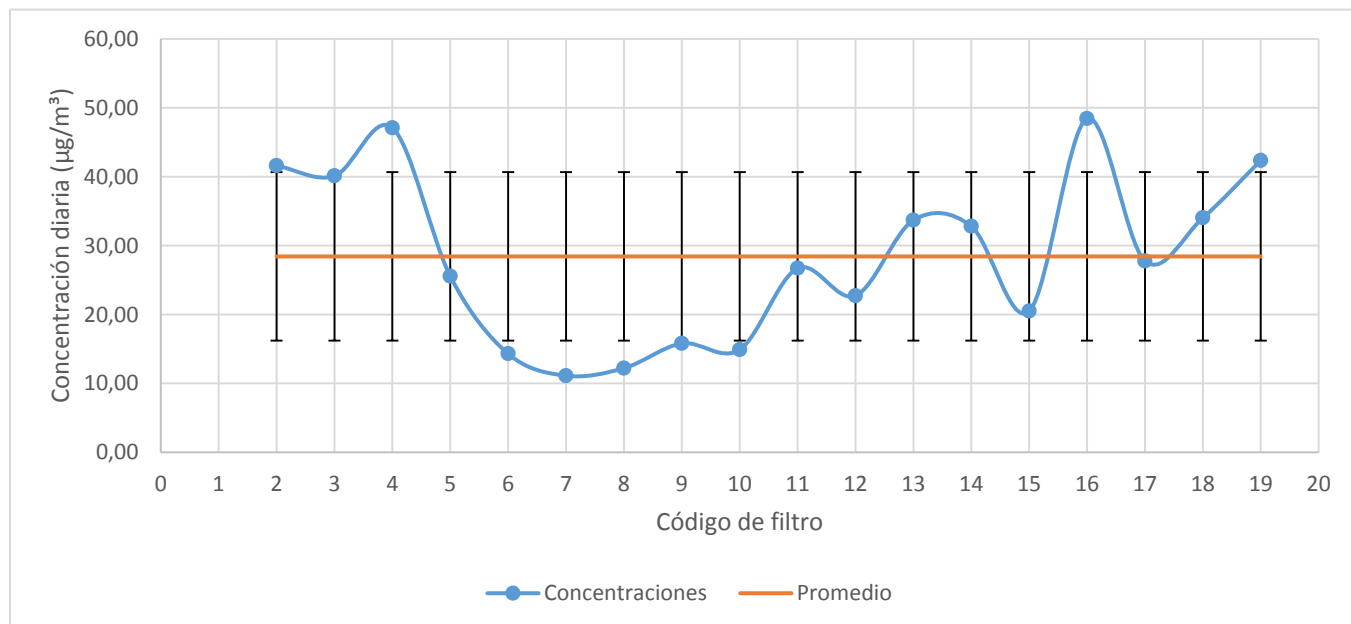
Imagen 15. Registro de datos en laboratorio

La Tabla 7 muestra los parámetros obtenidos durante el muestreo:

Tabla 7. Parámetros para cálculo de concentración de PM₁₀

| Código de filtro | Datos | | | | | | Cálculo | | | |
|------------------|-------|------------------------------|---------|-------|---------------|------------|--------------|----------------------|---------------------------|---------------------------|
| | Día | P stg. (in H ₂ O) | Ta (°C) | Po/Pa | Q Op (m³/min) | Tiempo (h) | Volumen (m³) | Volumen std (m³ std) | Masa PM ₁₀ (g) | Concentración (µg/m³ std) |
| 2 | 2 | 22.65 | 17 | 0.924 | 1.178 | 23.37 | 1652 | 1247 | 0.0519 | 41.6 |
| 3 | 3 | 23.15 | 17 | 0.923 | 1.181 | 23.55 | 1661 | 1254 | 0.0503 | 40.1 |
| 4 | 4 | 23.35 | 17 | 0.922 | 1.177 | 23.92 | 1684 | 1272 | 0.0599 | 47.1 |
| 5 | 5 | 23.4 | 16 | 0.922 | 1.177 | 23.77 | 1678 | 1271 | 0.0325 | 25.6 |
| 6 | 6 | 19.8 | 15.5 | 0.934 | 1.192 | 23.17 | 1658 | 1258 | 0.0180 | 14.3 |
| 7 | 7 | 22 | 16 | 0.927 | 1.176 | 24.47 | 1734 | 1313 | 0.0146 | 11.1 |
| 8 | 8 | 21.6 | 15 | 0.928 | 1.191 | 23.65 | 1681 | 1278 | 0.0156 | 12.2 |
| 9 | 9 | 23.3 | 16 | 0.922 | 1.179 | 23.06 | 1629 | 1234 | 0.0195 | 15.8 |
| 10 | 11 | 23.15 | 18 | 0.923 | 1.179 | 23.1 | 1631 | 1227 | 0.0183 | 14.9 |
| 11 | 12 | 23.8 | 19 | 0.92 | 1.177 | 24.1 | 1707 | 1280 | 0.0342 | 26.7 |
| 12 | 13 | 23.7 | 20 | 0.921 | 1.188 | 24.23 | 1725 | 1289 | 0.0293 | 22.7 |
| 13 | 14 | 24.15 | 21 | 0.920 | 1.188 | 23.84 | 1698 | 1264 | 0.0426 | 33.7 |
| 14 | 15 | 19.15 | 20 | 0.936 | 1.209 | 23.28 | 1681 | 1256 | 0.0412 | 32.8 |
| 15 | 16 | 19.8 | 19.5 | 0.934 | 1.199 | 23.55 | 1695 | 1269 | 0.0260 | 20.5 |
| 16 | 17 | 19.4 | 21 | 0.935 | 1.209 | 23.71 | 1714 | 1276 | 0.0618 | 48.4 |
| 17 | 18 | 19.45 | 19.5 | 0.935 | 1.198 | 23.38 | 1684 | 1260 | 0.0350 | 27.8 |
| 18 | 19 | 19.6 | 18.5 | 0.934 | 1.199 | 24.92 | 1792 | 1346 | 0.0458 | 34.0 |
| 19 | 20 | 19.55 | 19 | 0.935 | 1.202 | 23.53 | 1694 | 1270 | 0.0538 | 42.4 |

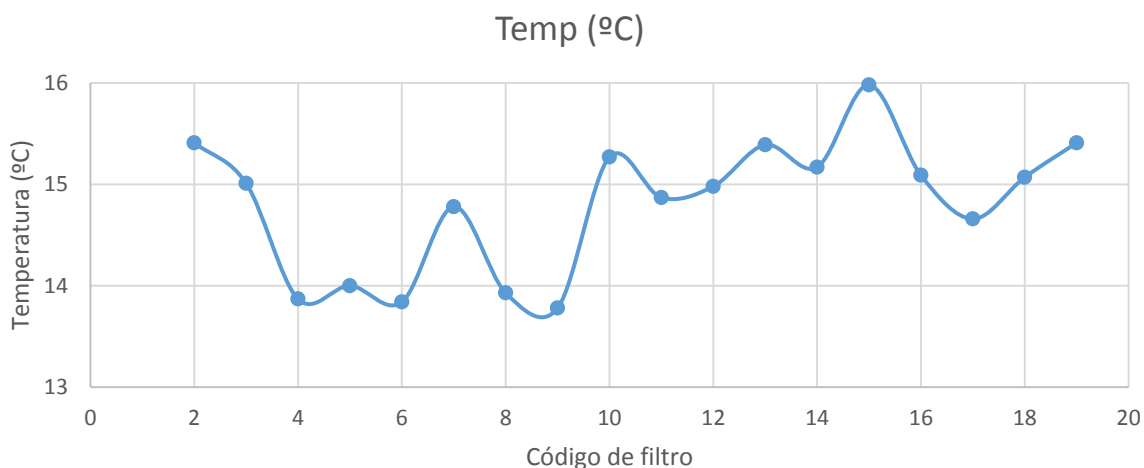
Teniendo el peso final de los filtros, se procedió a calcular la concentración de cada día según la metodología del Protocolo de Monitoreo y Vigilancia de la Calidad del Aire (MAVDT, 2010), dividiendo la diferencia entre el peso final y el inicial sobre el volumen muestreado obtenido a partir del caudal de operación del equipo, de tal manera se obtuvieron los siguientes resultados para cada día de muestreo:



Cuadro 8. Concentración diaria de PM_{10} durante el muestreo

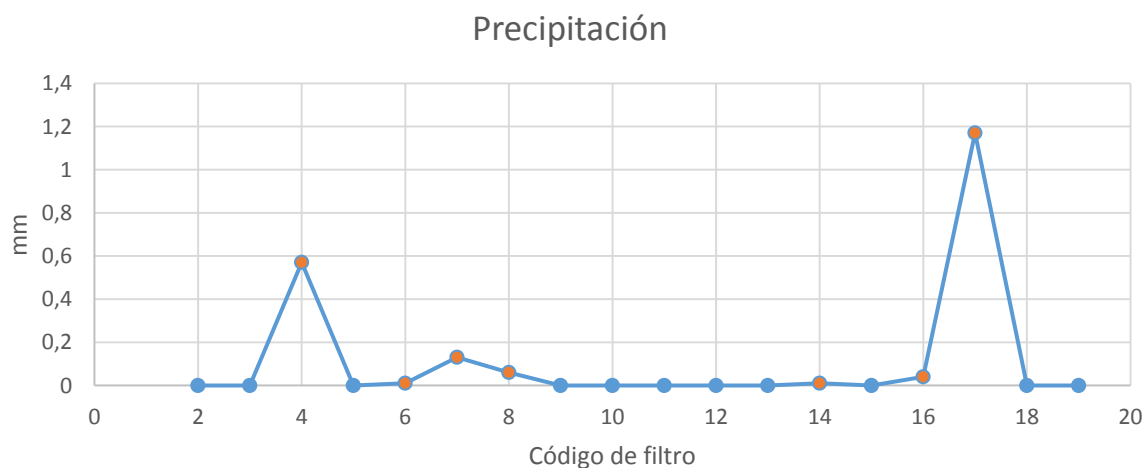
La concentración promedio durante el muestreo fue de $28,43 \mu g PM_{10}/m^3$, con una concentración mínima de $11,12 \mu g PM_{10}/m^3$ y máxima de $48,44 \mu g PM_{10}/m^3$. Cabe resaltar que desde el día 16 de marzo del 2018 y hasta después de la terminación del muestreo se presentó un evento por el cual se declaró en la ciudad una alerta amarilla por excedencia en concentración de $PM_{2.5}$, la cual fue atribuida a bajas velocidades del viento y arrastre de contaminantes provenientes de quemas e incendios en los llanos y la zona sur oriental del país (SDA, 2018). Durante el muestreo no se excedió el límite máximo permisible de $75 \mu g PM_{10}/m^3$ establecido por la Resolución 2254 del 2017 y el 28% de los días la concentración se mantuvo por debajo del límite de $20 \mu g PM_{10}/m^3$ definido por la Organización Mundial de la Salud.

Durante el muestreo se tuvo una temperatura ambiente promedio de $14,81 ^\circ C$, con una temperatura diaria máxima de $16^\circ C$ y mínima de $13,8 ^\circ C$.



Cuadro 9. Temperatura promedio diaria durante el muestreo

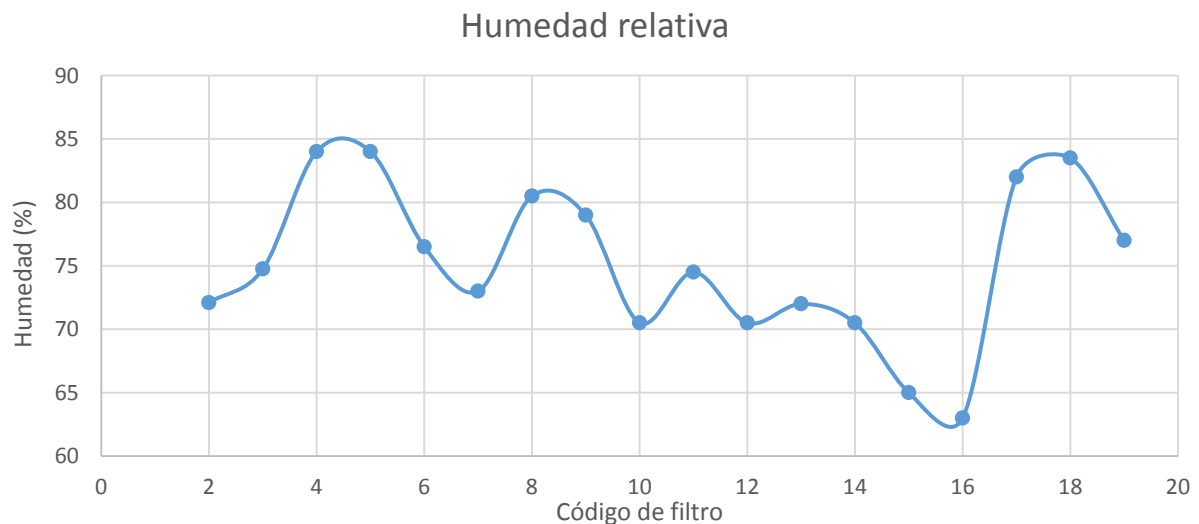
En los 18 días de muestreo, se tuvieron 7 días de lluvias (durante los cuales el máximo de horas de lluvia en un día fue de 4 horas), con una precipitación máxima de 1,17 mm/día, la cual corresponde a un día en el que la concentración de PM₁₀ bajó de 48,44 µg/m³ a 27,77 µg/m³; asimismo, entre los días 6, 7 y 8 se presenta una relación directa entre la precipitación y los niveles del contaminante. Sin embargo, el segundo día de mayor precipitación (0,57 mm) se incrementó la concentración de material particulado en 6,99 µg/m³.



Cuadro 10. Precipitación diaria durante el muestreo

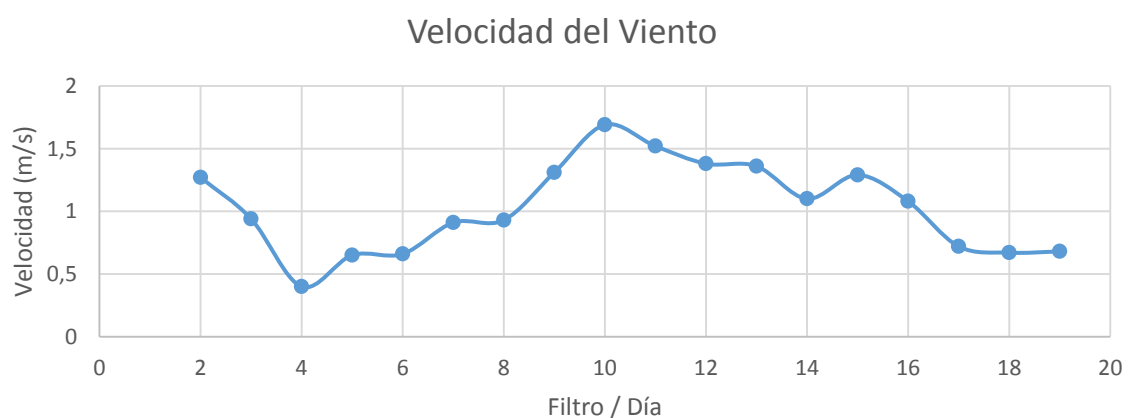
La humedad relativa media fue de 75,13%, con un mínimo de 63% y un máximo de 84%. Desde el código de filtro 15 puede apreciarse una relación inversa entre el comportamiento de la humedad relativa y los niveles de PM₁₀, viéndose

incrementada la concentración de material particulado cuando se reduce la humedad y, asimismo, la concentración fue menor cuando se registraron mayores valores de humedad relativa. Esto puede atribuirse a que las partículas son susceptibles de absorber el agua suspendida en el aire, aumentando su masa y facilitando su precipitación (Rojano, Pérez, & Freyle, 2012).



Cuadro 11. Humedad relativa promedio diaria durante el muestreo

La máxima velocidad del viento inmediata fue de 4 m/s, mientras que la máxima velocidad del viento promedio diaria fue de 1,7 m/s y mínima de 0,4 m/s. Entre los días correspondientes a los filtros 3 a 7 y 9 a 16 se puede apreciar una relación inversa entre la velocidad del viento y la concentración de material particulado, esto puede deberse a que una mayor velocidad del viento facilita la dispersión de contaminantes y favorece la turbulencia atmosférica, que disipa y previene inversiones térmicas (Unal, Toros, Deniz, & Incecik, 2011).



Cuadro 12. Velocidad del viento promedio diaria durante el muestreo

La dirección predominante del viento durante los 18 días de muestreo fue hacia el Sureste, y, durante los días con mayor concentración de material particulado, la dirección predominante del viento fue hacia el oeste, resultando, probablemente, en una combinación entre las emisiones vehiculares de la vía inmediatamente aledaña (calle octava) y las vías cercanas por el este (carreras quinta y cuarta).

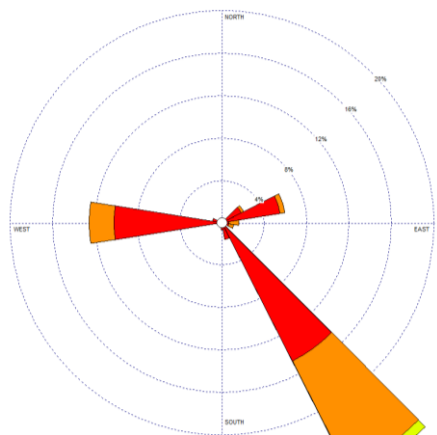


Imagen 17. Rosa de los Vientos Muestreo (02/03/2018 - 21/03/2018)

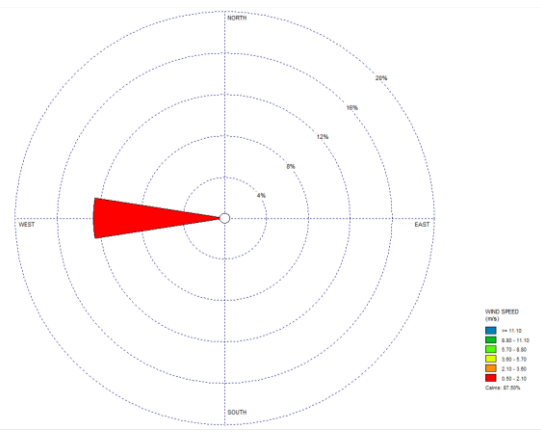


Imagen 18. Rosa de los Vientos (Filtro 4 - 04/03/2018)

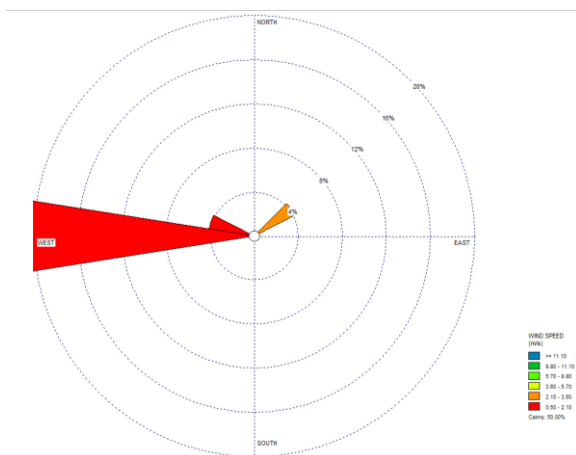


Imagen 19. Rosa de los Vientos (Filtro 16 - 17/03/2018)

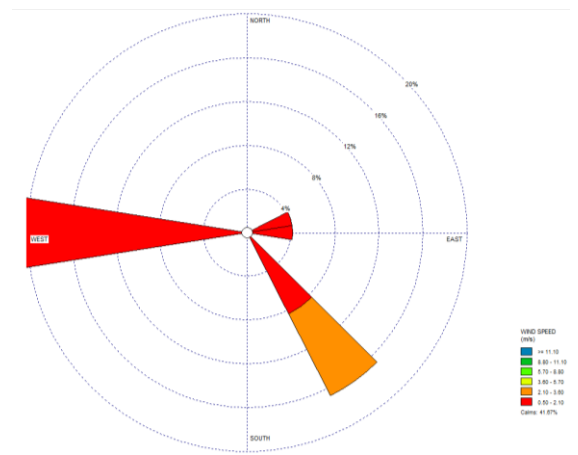
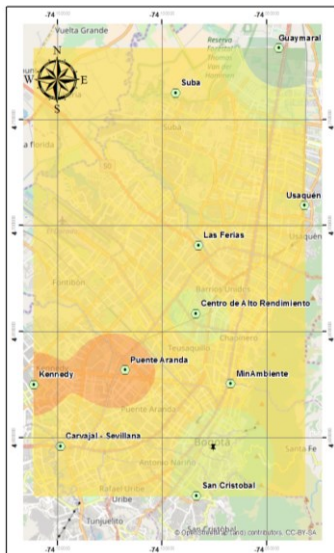


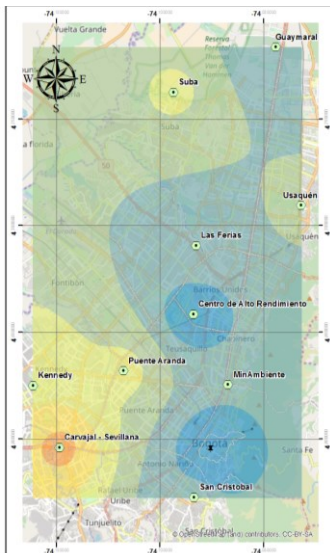
Imagen 20. Rosa de los Vientos (Filtro 19 - 20/03/2018)

Haciendo uso del software ArcGis 10.4 y los datos de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Bogotá, se generaron salidas gráficas de dispersión de PM_{10} en la ciudad para los días de muestreo por medio de la técnica de interpolación IDW, ya que se encuentra entre los métodos más precisos para interpolación de información faltante sobre calidad del aire (Londoño & Cañón, 2015) . En los mapas 3, 4, 5 y 6 se puede apreciar como los niveles máximos y mínimos de PM_{10} en el sitio de muestreo se dieron durante periodos de altas y bajas concentraciones del contaminante en la ciudad respectivamente.

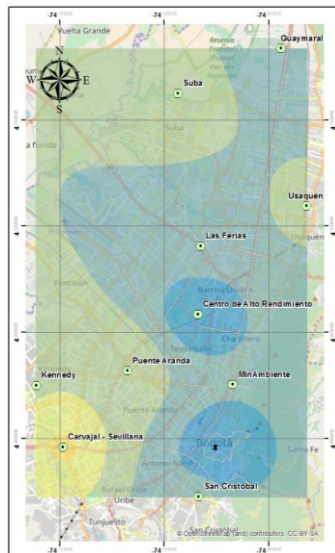
Mapa 3. PM₁₀ en Bogotá (04/03/2018)



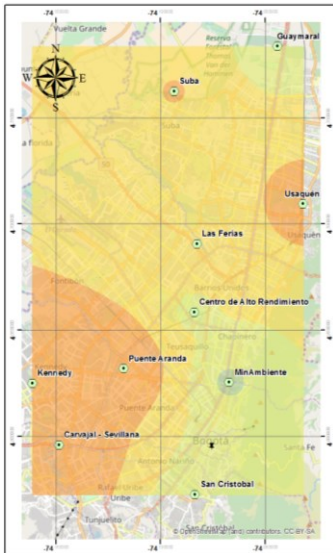
Mapa 6. PM₁₀ en Bogotá (07/03/2018)



Mapa 5. PM₁₀ en Bogotá (08/03/2018)

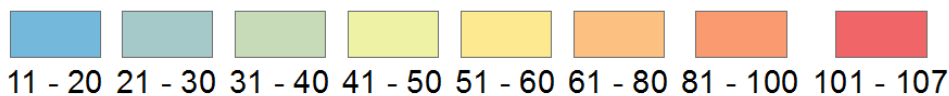


Mapa 4. PM₁₀ en Bogotá (17/03/2018)



1:125.000

PM₁₀ (µg/m³)

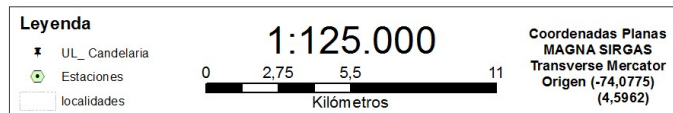
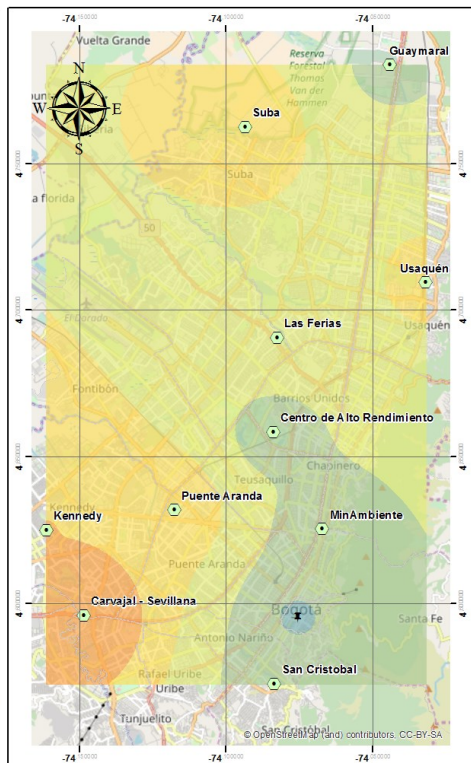
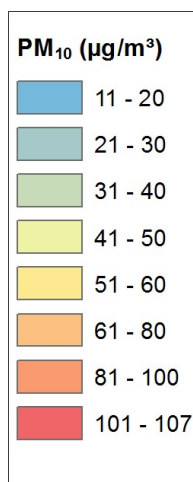


UL_Candelaria

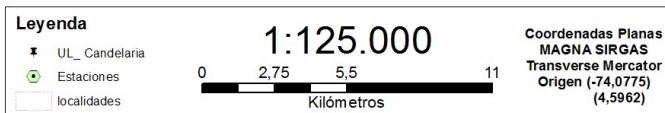
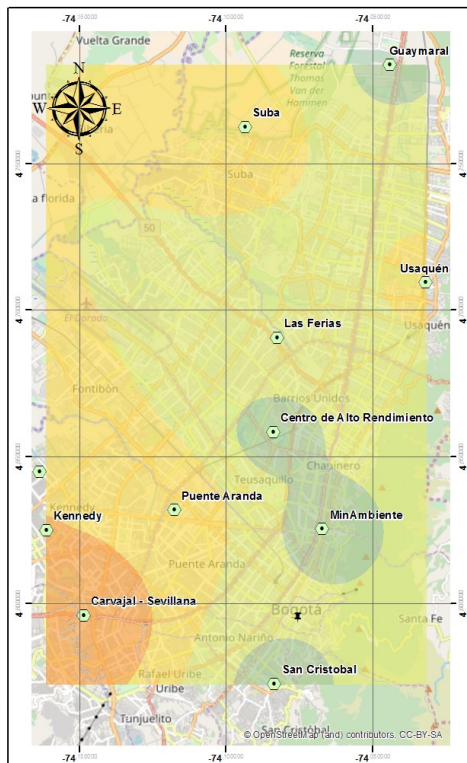
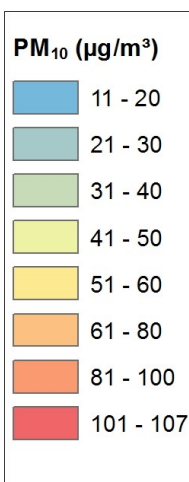
Estaciones

localidades

Universidad Libre
Ingeniería Ambiental
Julieth Caballero
Daniel Valencia
30 de marzo del 2018



Universidad Libre
Ingeniería Ambiental
Julieth Caballero
Daniel Valencia
30 de marzo del 2018



Mapa 8. IDW PM₁₀ Bogotá - Incluyendo estación Candelaria (02/03/2018 - 20/03/2018)

Mapa 7. IDW PM₁₀ Bogotá - Sin estación Candelaria (02/03/2018 - 20/03/2018)

Adicionalmente, se comparó la concentración obtenida contra el resultado del método de interpolación IDW calculado sin tener en cuenta los datos del muestreo, de esta manera se puede apreciar la diferencia del dato reportado y, como se puede apreciar en los mapas 7 y 8, el método de interpolación entrega una concentración entre 41 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el periodo del 2 de marzo hasta el 20 de marzo del 2018, mientras que con el muestreo se obtuvo una concentración de 28,43 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{10} para el mismo periodo de tiempo, esta diferencia se puede atribuir al comportamiento de las diferentes variables meteorológicas y locativas (presencia de barreas, tráfico vehicular, fuentes fijas) entre el punto de muestreo y las estaciones de monitoreo más cercanas.

La Tabla 8 muestra la diferencia entre obtenida durante cada día de muestreo y la concentración reportada por las dos estaciones de monitoreo de calidad del aire más cercanas a la zona de estudio: *MinAmbiente* (3.98 km) y *San Cristobal* (2.68 km).

Tabla 8. Diferencia del muestreo con estaciones RMCAB cercanas

| Fecha | MinAmbiente ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | San Cristobal ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | Candelaria ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | Dif. [MinAmbiente - Cand] ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | Dif. [S. Cristobal - Cand.] ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) |
|------------|--|--|---|--|--|
| 2/03/2018 | - | 37.3 | 41.61 | - | -4.31 |
| 3/03/2018 | - | 42.3 | 40.12 | - | 2.18 |
| 4/03/2018 | - | 49.6 | 47.11 | - | 2.49 |
| 5/03/2018 | - | 36.5 | 25.57 | - | 10.93 |
| 6/03/2018 | - | 24.2 | 14.31 | - | 9.89 |
| 7/03/2018 | - | 21.2 | 11.12 | - | 10.08 |
| 8/03/2018 | - | 22 | 12.21 | - | 9.79 |
| 9/03/2018 | - | 23.9 | 15.81 | - | 8.09 |
| 11/03/2018 | 18.9 | 25.2 | 14.91 | 3.99 | 10.29 |
| 12/03/2018 | 28.2 | 31.7 | 26.72 | 1.48 | 4.98 |
| 13/03/2018 | 35 | 37.3 | 22.73 | 12.27 | 14.57 |
| 14/03/2018 | 33.8 | 37.3 | 33.69 | 0.11 | 3.61 |
| 15/03/2018 | 48.2 | 55 | 32.80 | 15.4 | 22.2 |
| 16/03/2018 | 31 | 40.4 | 20.49 | 10.51 | 19.91 |
| 17/03/2018 | 38.2 | 43.9 | 48.44 | -10.24 | -4.54 |
| 18/03/2018 | 46.5 | 50.8 | 27.77 | 18.73 | 23.03 |
| 19/03/2018 | 34.8 | 34.3 | 34.03 | 0.77 | 0.27 |
| 20/03/2018 | 47.4 | 47.2 | 42.36 | 5.04 | 4.84 |
| Promedio | 36.2 | 36.67 | 28.43 | 7.77 | 8.24 |

Fuente: (SDA, 2018)

Se resaltan en amarillo las fechas en la que la concentración encontrada con el muestreo superó a la reportada por las estaciones. La diferencia promedio con *MinAmbiente* fue de 20.8% y con *San Cristobal* de 26.5%, aunque se esperaría que la diferencia fuera mayor con *MinAmbiente*, ya que se encuentra a una mayor distancia, por tanto, se puede decir que durante el periodo estudiado los niveles de PM_{10} de las dos estaciones y la zona de muestreo fueron independientes entre ellas, aun cuando sus tendencias a incrementar y disminuir concuerden con el comportamiento del resto de estaciones en Bogotá.

8. IDENTIFICACIÓN DE MINERALES

Después de haber obtenido el peso final de los 18 filtros, se almacenaron dentro de bolsas ziploc y sobres de manila. Posteriormente, fueron analizados en un espectrómetro FTIR para identificar a los minerales que se encuentran presentes en el PM₁₀ recolectado.

8.1 Obtención de los espectros

Inicialmente, fue necesario crear un blanco para corregir por la composición de los filtros, utilizando un filtro nuevo en mezcla con bromuro de potasio (KBr). Habiendo creado el blanco, se construyeron cápsulas de análisis tomando el material particulado de cada filtro y mezclándolo con el KBr.



Imagen 22. Creación del blanco (Filtro + KBr)

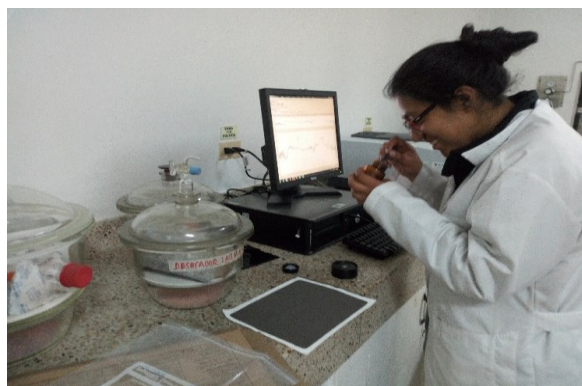


Imagen 21. Construcción de cápsulas (Muestras + KBr)

Se registró el espectro obtenido para cada cápsula, para el cual el software IRsolution realizó la substracción automática del blanco.

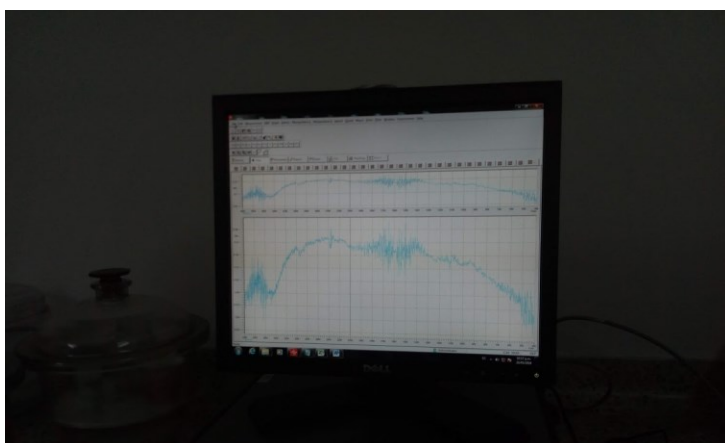


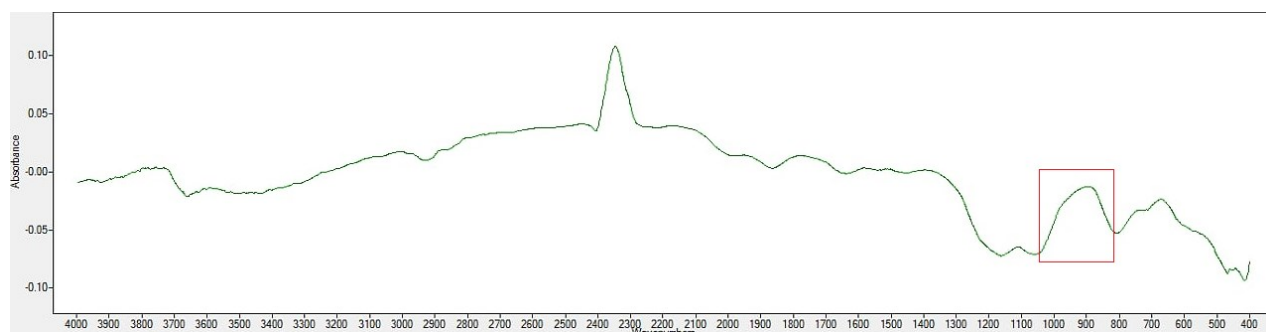
Imagen 23. Obtención del espectro corregido

8.2 Identificación de minerales

A continuación se relacionan los minerales encontrados junto a un espectro analizado por cada mineral (Kumar & Rajkumar, 2014). La totalidad de los espectros analizados se encuentra en el **ANEXO 2 – Espectros FTIR**.

Cuarzo

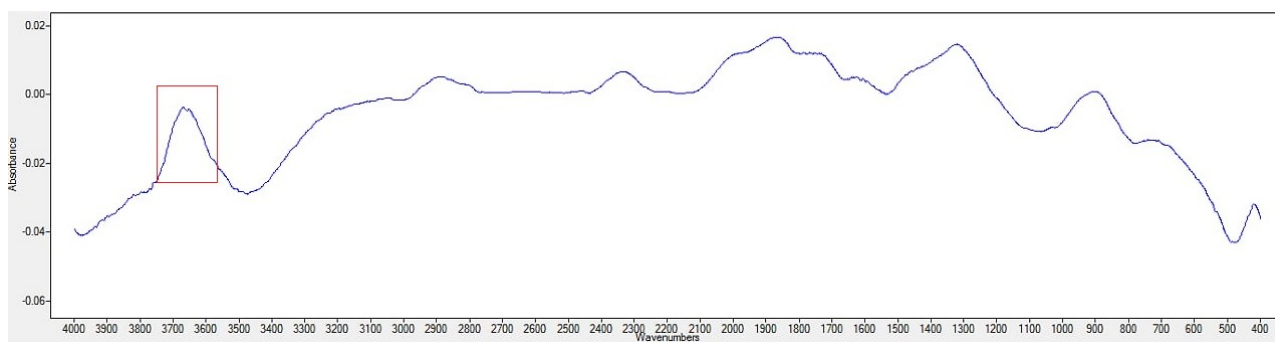
El cuarzo contiene enlaces de Si-O que son los enlaces más fuertes en la estructura de silicato y se pueden reconocer fácilmente en el espectro infrarrojo de tales minerales por bandas muy fuertes en la región de $900\text{--}1000\text{cm}^{-1}$ debido al estiramiento (Vahur, s.f). El mineral de cuarzo se detectó en las muestras 4, 6, 8, 14 y 19, tal como se muestra en el Espectro 1:



Espectro 1. FTIR Muestra 4, Cuarzo

Caolinita

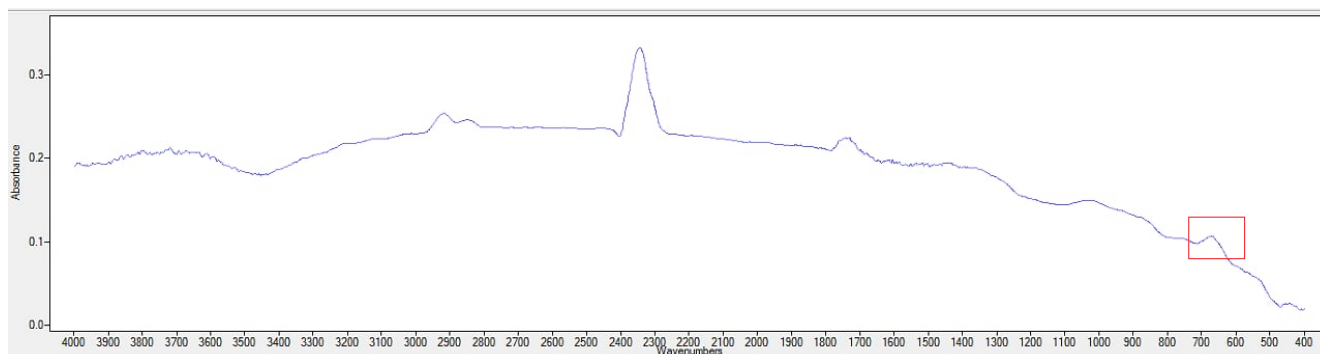
La caolinita con una fórmula estructural de $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ es electrostáticamente neutra y tiene simetría triclinica. Los átomos de oxígeno y los iones hidroxilo entre las capas se emparejan con enlaces de hidrógeno. Las arcillas de caolinita son minerales comunes del suelo que a menudo aparecen en el material particulado atmosférico. La frecuencia de absorción donde puede ser encontrado es 3653 cm^{-1} , que son los picos característicos de la caolinita mineral de arcilla debido al estiramiento OH de los grupos hidroxilo de la superficie interna. El mineral se dividió en las muestras 6, 7, 10 y 18 como se muestra en el Espectro 2:



Espectro 2. FTIR Muestra 6, Caolinita

Vermiculita

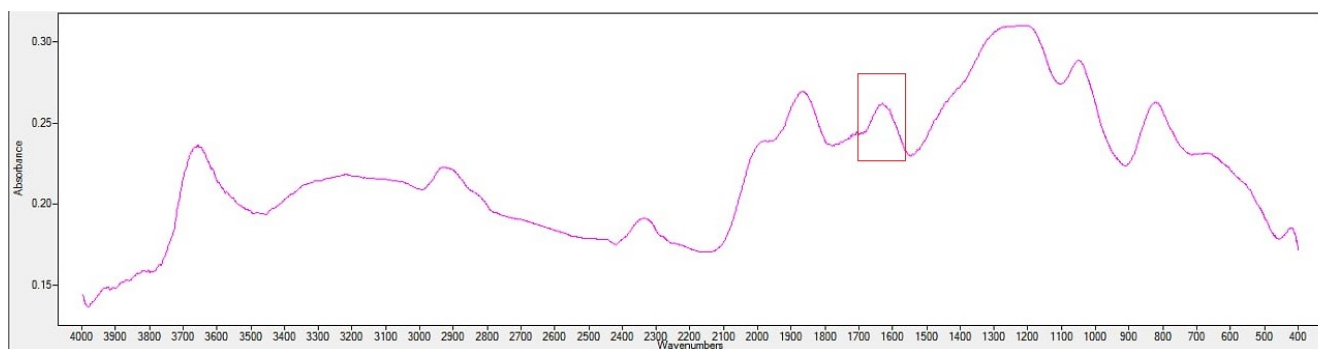
La vermiculita ($\text{Mg, Fe}^{2+}, \text{Al}$)₃ (Al, Si)₄ O_{10} (OH)₂ \cdot 4(H_2O) consiste en las láminas de mica trioctaédrica o talco que se separan por capas de moléculas de agua. La vermiculita se pudo encontrar en 5 muestras de 18. Las frecuencias observadas de vermiculita son 660 cm^{-1} debido a la vibración simétrica del modo de flexión Si-O. Tal como se muestra a continuación:



Espectro 3. FTIR Muestra 11, Vermiculita

Palygorskita

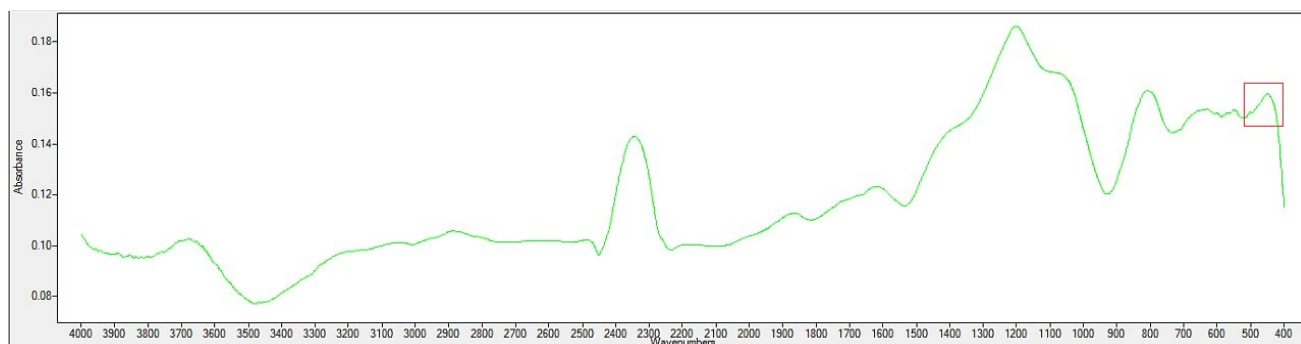
La palygorskita es un mineral de silicato de magnesio hidratado fibroso o de tipo papiro y se incluyen en el grupo filosilicato porque contienen una lámina tetraédrica bidimensional continua de composición Si_2O_5 . Este mineral se encontró en las muestras 7 y 10, que tenían frecuencias en de 1647 cm^{-1} dado a la deformación de O-H.



Espectro 4. FTIR Muestra 7, Palygorskita

Sepiolita

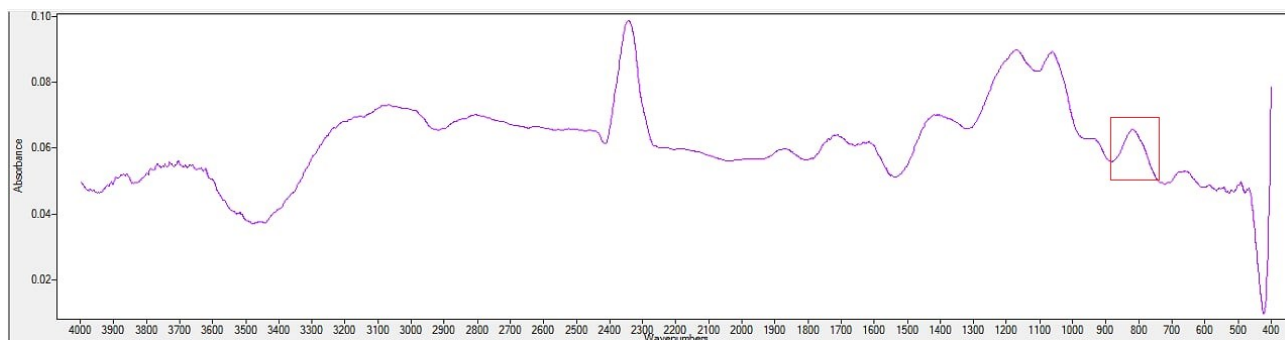
La sepiolita es un mineral cuya fórmula es $\text{Mg}_4\text{Si}_6\text{O}_{15}(\text{OH})_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, está presente en 9 de 18 muestras que tienen frecuencias en 437 cm^{-1} por el estiramiento de O-H del grupo hidroxilo, como se muestra en el siguiente espectro:



Espectro 5. FTIR Muestra 5, Sepiolita

Imogolita

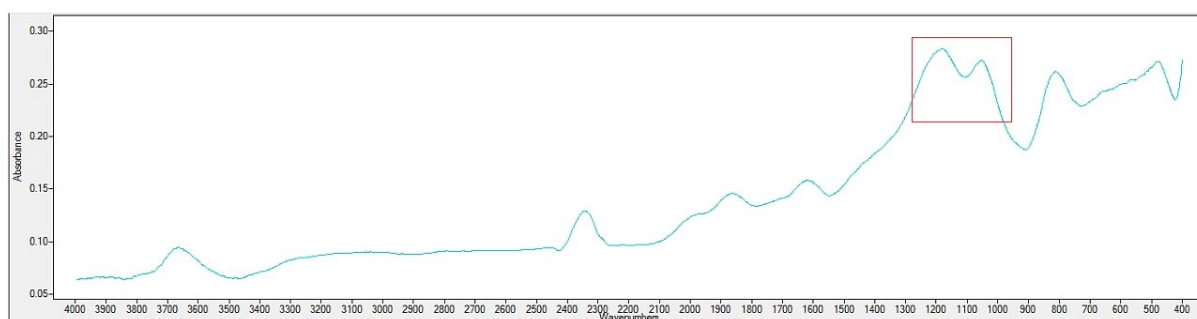
La imogolita es un mineral de silicato de aluminio que tiene como fórmula $\text{Al}_2\text{SiO}_3(\text{OH})_4$, por lo cual se puede observar en la frecuencia a 854 cm^{-1} debido al modo de flexión Si-OH, haciéndose presente en 8 muestras.



Espectro 6. FTIR Muestra 3, Imogolita

Asbesto

El asbesto es un grupo natural de silicato mineral que se puede encontrar naturalmente en el aire y su espectro infrarrojo se exhibe en frecuencias intensas de 1200-1000 cm^{-1} dado por la vibración del estiramiento de Si-O y se demostró su presencia en las muestras 3, 5, 7, 9 y 17, como se muestra a continuación:



Espectro 7. FTIR Muestra 9, Asbesto

En la siguiente tabla se señalan los minerales identificados y las muestras en las que fueron encontrados:

Tabla 9. Minerales encontrados

| Mineral | Muestra | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Total | Porcentaje de muestras que lo contienen |
|--------------|---------|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-------|---|
| | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | | | |
| Cuarzo | | | x | | x | | x | | | | | | x | | | | | x | 5 | 28% | |
| Caolinita | | | | | x | | | | x | | | | | | | | x | | 3 | 17% | |
| Vermiculita | | x | x | | | | x | | | x | | | x | | | | | | 5 | 28% | |
| Paligorskita | | | | | | x | | | x | | | | | | | | | | 2 | 11% | |
| Sepiolita | | | | x | x | x | x | | x | | x | x | | x | x | x | | | 10 | 56% | |
| Imogolita | | x | | x | | x | | x | | | x | | | | x | x | x | | 8 | 44% | |
| Asbesto | | x | | x | | x | | x | | | | | | | | | x | | 5 | 28% | |

La sepiolita y la paligorskita son materiales de arcilla que se pueden encontrar en las llantas de los automóviles y como desprendimiento de paisajes montañosos, estos minerales no se clasifican como carcinógenos pero la exposición prolongada a estos se asocia a deterioro de la función pulmonar (Park, 2018).

La Vermiculita puede provenir de las chimeneas en restaurantes aledaños que queman leña y carbón, y se ha asociado a enfermedad pulmonar pleuroparenquimal cuando viene acompañada de fibras de asbesto (Kumar & Rajkumar, 2014).

La presencia de cuarzo en el material particulado se puede atribuir al deterioro de las vías pavimentadas por el tránsito vehicular (EPA, 1996), este mineral es uno de los componentes más biopersistentes del material particulado ya que puede permanecer en el parénquima pulmonar (Li, y otros, 2016) y se le atribuye un efecto genotóxico secundario al causar inflamación en los macrófagos alveolares, lo que resulta en la producción de oxidantes carcinógenos (Born, Tran, & Donaldson, 2011).

El asbesto puede provenir de rupturas en materiales que conforman las casas y edificaciones construidas con fibrocemento, y existe extensiva evidencia científica de que los asbestos causan asbestosis, mesotelioma y cáncer pulmonar (Takahashi & Landrigan, 2016).

La caolinita puede provenir de desgaste del caucho, cemento, pintura y porcelanas; y, aunque su insolubilidad en agua le concede una considerable inactividad química, puede causar fibrosis nodular si se deposita en los pulmones y desarrollar neumoconiosis leve (Wells, Bhatt, & Flanagan, 1985).

9. ANÁLISIS DEL RIESGO POR EXPOSICIÓN A PM₁₀

Para el cumplimiento de este objetivo se siguieron los cuatro pasos descritos en la metodología de evaluación del riesgo a la salud humana por contaminantes ambientales (EPA, 2014):

9.1 Identificación del peligro

El primer paso de la evaluación del riesgo consiste en verificar que la sustancia estudiada se encuentra asociada a efectos adversos en la salud humana. El material particulado se reconoce mundialmente como un factor agravante de enfermedades cardiovasculares y respiratorias y aumento de la tasa de mortalidad (EPA, 2009); asimismo, es un contaminante criterio para definir la calidad del aire en Colombia (MADS, 2017).

9.2 Evaluación de la exposición

En el objetivo 2 se determinó el nivel de PM₁₀ por medio de un muestreo de 18 días del cual se obtuvo una concentración promedio diaria de 28,43 µg/m³; se encontró también que el contaminante proviene en su mayoría de la quema de combustibles fósiles en los vehículos que circulan por la zona de estudio, y que contiene compuestos minerales como caolinita, pirofilita, vermiculita, esmectita, sepiolita, imagolita, hematita, asbesto, magnetita, dolomita y goethita. El material particulado puede ser inhalado por la boca y la nariz, y las personas se ven expuestas a la concentración encontrada mientras transiten por la zona o permanezcan en ella.

9.3 Evaluación de la dosis-respuesta

La concentración promedio diaria de PM₁₀ obtenida en el objetivo 2 se utilizó junto a las funciones dosis-respuesta propuestas por Sánchez et al., 1997, para calcular el número de muertes atribuibles anualmente a la exposición a PM₁₀ en la zona aledaña a la Universidad Libre – Sede Candelaria, asumiendo que el contaminante mantenga una concentración promedio similar durante todo el año.

La información requerida sobre la tasa de mortalidad en Bogotá fue obtenida del DANE con 21560 muertes al año excluyendo muertes violentas y aquellas no relacionadas con enfermedades cardiovasculares (DANE, 2017). A continuación, se presentan los cálculos empleados:

$$Tasa\ de\ Mortalidad = \frac{Mortalidad\ neta\ excluyente}{Población\ Bogotá} = \frac{21560}{6840116} * 100\% = 0,3152\%$$

$$NMA\ (Alto) = 0,336 * \frac{28,43\ \frac{\mu g\ PM_{10}}{m^3}}{100} * 0,3152\% * 24476 = 7,4 \approx 7$$

$$NMA\ (Medio) = 0,1 * \frac{28,43\ \frac{\mu g\ PM_{10}}{m^3}}{100} * 0,3152\% * 24476 = 2,2 \approx 2$$

$$NMA\ (Bajo) = 0,084 * \frac{28,43\ \frac{\mu g\ PM_{10}}{m^3}}{100} * 0,3152\% * 24476 = 1,8 \approx 2$$

A partir del cálculo anterior, si la concentración de PM₁₀ se mantiene sobre un promedio anual de 28,43 µg/m³, se pueden esperar entre 2 y 7 muertes al año asociadas a efectos cardiovasculares y respiratorios, los cuales, gracias a la vasta teoría existente en el asunto, se pueden relacionar directamente a la inhalación de material particulado (EPA, 2009).

9.4 Caracterización del riesgo

La caracterización del riesgo requiere calcular los coeficientes de riesgo crónico y agudo para los grupos receptores y compararlos con niveles de referencia, esto se realizó por medio de las siguientes ecuaciones:

$$Coeficiente\ de\ Riesgo\ Crónico = \frac{Dosis\ diaria\ promedio}{Nivel\ de\ Exposición\ de\ Referencia\ Anual}$$

$$Coeficiente\ de\ Riesgo\ Agudo = \frac{Dosis\ horaria\ promedio}{Nivel\ de\ Exposición\ de\ Referencia\ Diario}$$

Las dosis promedio se calculan en función de la concentración del contaminante, la tasa de inhalación y el peso promedio del receptor:

$$DHP = \text{Concentración} \left(\frac{\mu g}{m^3} \right) * \frac{TI \left(\frac{m^3}{hora} \right)}{PCP (kg)}$$

$$DDP = \frac{C * TI * EX \left(\frac{m^3}{día} \right)}{PCP * TT (kg)}$$

Donde

$$C = \text{Concentración} \left(\frac{\mu g}{m^3} \right)$$

$$PCP = \text{Peso corporal promedio (kg)}$$

$$TI = \text{Tasa de inhalación} \left(\frac{m^3}{hora \text{ ó } día} \right)$$

$$EX = \text{Exposición (días)}$$

$$PCP = \text{Peso corporal promedio (kg)}$$

$$TE = \text{Tiempo diario de exposición (horas)}$$

$$EF = \text{Frecuencia exposición} \left(\frac{días}{año} \right)$$

$$DE = \text{Duración de exposición (años)}$$

Fuente: (Morakinyo, Adebawale, Mokgobu, & Mukhola, 2017)

Se eligieron los grupos de edad (receptores), tasas de inhalación y pesos corporales promedio según el manual de factores de exposición de la EPA, 2011. La siguiente tabla muestra la información de entrada utilizada para el cálculo de las dosis promedio:

Tabla 10. Información de entrada para el cálculo de dosis promedio

| Grupo de edad (años) | FE (días/año) | DE (años) | TT (días) | TE (horas/día) | TI Aguda (m³/hora) | TI Crónica (m³/día) | PCP (kg) |
|----------------------|---------------|-----------|-----------|----------------|--------------------|---------------------|----------|
| 0 - 3 | 350 | 3 | 1095 | 1 | 0.28 | 7.43 | 8.75 |
| 3 - 11 | 350 | 9 | 3285 | 6 | 0.98 | 66.3 | 25.2 |
| 11 - 16 | 350 | 14 | 5110 | 5 | 1.14 | 76 | 56.8 |
| 16 - 21 | 350 | 19 | 6935 | 4 | 1.14 | 65.2 | 71.6 |
| 21 - 61 | 350 | 30 | 10950 | 4 | 1.32 | 63.4 | 80 |
| >61 | 350 | 30 | 10950 | 3 | 1.12 | 39.3 | 80 |

Los niveles de exposición de referencia fueron tomados de la resolución 2254 del 2017 (MADS, 2017) que establece la concentración máxima permisible diaria de PM₁₀ de 75 µg/m³ y anual de 35 µg/m³. La Tabla 11 muestra los valores de dosis y coeficientes de riesgo para cada grupo receptor.

Tabla 11. Dosis promedio y coeficientes de riesgo

| Grupo de edad (años) | DHP (µg/kg/h) | DDP (µg/kg/día) | CRA | CRC* |
|----------------------|---------------|-----------------|------|------|
| 0 - 3 | 0.91 | 23.15 | 0.29 | 0.66 |
| 3 - 11 | 1.11 | 430.34 | 0.35 | 12.3 |
| 11 - 16 | 0.57 | 182.38 | 0.18 | 5.21 |
| 16 - 21 | 0.45 | 99.3 | 0.14 | 2.84 |
| 21 - 61 | 0.47 | 86.42 | 0.15 | 2.47 |
| >61 | 0.4 | 40.18 | 0.13 | 1.15 |

***Nota:** El cálculo del coeficiente de riesgo crónico se realiza bajo la suposición de que la concentración promedio anual de PM_{10} sea igual a la concentración promedio diaria de $28,43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ encontrada en este estudio.

Según el coeficiente de riesgo agudo, son bajas las probabilidades de que se presenten efectos graves en la salud por exposiciones cortas al material particulado de la zona, y, por el contrario, se pueden esperar graves efectos a la salud por exposición prolongada al contaminante, especialmente en niños y adolescentes entre 3 a 11 años y 11 a 16 años respectivamente. La exposición a niveles entre $29,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $56,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{10} se ha asociado con hospitalización por de bronquiolitis en niños (Carugno, y otros, 2018), niveles mayores a $43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con hospitalizaciones por enfermedades cardiovasculares (Muthiah, y otros, 2018), y niveles entre $27,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $41,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con casos de dermatitis atópica en estudiantes de preescolar (Oh, y otros, 2018). Asimismo, los minerales encontrados en el objetivo 3 han sido asociados con efectos agudos como tos, fiebre e irritación de los ojos; y con efectos crónicos como asbestosis, cáncer pulmonar y trastorno pleuroparenquimal pulmonar.

10. LIMITACIONES

Varios de los resultados de este estudio provienen de estimaciones sujetas a diversos errores que pueden afectar su representatividad como a continuación se expone:

La información sobre la edad del parque automotor fue obtenida de cifras nacionales del RUNT recopiladas en un informe de la Asociación Colombiana de Vehículos Automotores, y, aunque esta opción sigue siendo más cercana a la realidad que los valores por defecto recomendados por la EPA (2014), es posible que la distribución porcentual de edad del parque automotor en Bogotá e incluso en la zona específica de estudio, difiera ligeramente de los datos utilizados. Asimismo, la información de velocidad vehicular fue obtenida por medio de un aforo realizado en campo durante un día, existiendo la posibilidad de que la velocidad vehicular promedio varíe a lo largo de la semana. En consecuencia, es posible que el resultado de la simulación de emisiones vehiculares se encuentre por encima o por debajo del valor real, puesto que un mayor porcentaje de vehículos de modelos antiguos llevan al software a asignar tecnologías de control de emisiones menos efectivas y menores velocidades aumentan el tiempo de emisión.

Los modelos de dispersión utilizados (al igual que cualquier modelo) son simplificaciones de la realidad (Nevers, 1998), y, por tanto, desprecian variables complejas como barreras inmediatas y corrientes de viento generadas por vehículos desplazándose a altas velocidades; por ello, la concentración estimada de material particulado debida al flujo vehicular podría ser menor gracias a una mejor dispersión de contaminantes del aire que no se contempla en el cálculo, o también, en el caso del modelo de celda fija, la concentración puede ser mayor debido a la dispersión del contaminante en todas las direcciones.

Aunque el muestreo de material particulado fue efectuado según el Protocolo de Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire (MAVDT, 2010), se incumplió con la altura máxima de 15 metros, dando prioridad a las condiciones de seguridad y logísticas.

El cálculo del número de muertes atribuibles al año a la exposición a PM_{10} en la zona de estudio utiliza una tasa de mortalidad basada en cifras de mortalidad anual en Bogotá excluyendo muertes violentas; lo anterior implica que la tasa de mortalidad puede ser diferente para el caso particular de La Candelaria y que los casos de mortalidad tenidos en cuenta pueden corresponder a causas diferentes de enfermedades cardiovasculares y respiratorias.

A pesar de las potenciales fuentes de error expuestas, se resalta que se siguieron las metodologías citadas para reducir al mínimo el margen de desviación de los resultados y que, el estudio representa una primera aproximación al estado de la calidad del aire en la localidad La Candelaria y el riesgo al que se encuentra expuesta la población.

11. CONCLUSIONES

- Por su flujo diario, los vehículos pequeños a cuatro ruedas (taxis y automóviles particulares) son la fuente de emisión de material particulado más significativa en la zona de estudio.
- Se encontró una relación inversamente proporcional entre la concentración de PM₁₀ y las variables de temperatura y velocidad del viento.
- Respecto a los niveles de material particulado (PM₁₀), no se incumple la legislación colombiana ni el límite de 50 µg/m³ en 24 horas recomendado por la Organización Mundial de la Salud.
- Los minerales sepiolita e imogolita son los que se encontraron en mayor número de muestras del material particulado de la zona; mientras que la palygorskita y caolinita fueron encontrados en menos del 20% de las muestras.
- La exposición al PM₁₀ en la zona aledaña a la Universidad Libre – Sede Candelaria puede resultar en entre 2 y 7 muertes al año (esta estimación es aproximada a partir de los datos de mortalidad en la ciudad de Bogotá D.C.) y causar padecimientos como bronquiolitis y cáncer pulmonar, siendo una mayor amenaza para niños entre 3 y 11 años de edad.

BIBLIOGRAFÍA

1. Agencia Mobiliaria Virgilio Barco. (2 de Abril de 2013). *PREFACTIBILIDAD DEL ESTUDIO DE MOVILIDAD DEL CENTRO HISTÓRICO DE BOGOTÁ*. Recuperado el 15 de Diciembre de 2016, de Informe de Movilidad:
<http://www.agenciavirgiliobarco.gov.co/proyectos/Documents/Paginanueva2016/Ministerios/3Anexostecnicos/ANEXO3InformeMovilidad.pdf>
2. Alcaldía de Bogotá. (26 de Diciembre de 2011). *Consulta de la Norma*. Recuperado el 22 de Octubre de 2016, de DECRETO 623 DE 2011:
<http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=45155>
3. Alcaldía Local de La Candelaria. (26 de Diciembre de 2013). *Diagnóstico de la Alcaldía Local*. Recuperado el 20 de Diciembre de 2016, de Plan Ambiental Local 2013 - 2016: <http://www.ambientebogota.gov.co/web/sda/la-candelaria>
4. Alcaldía Mayor de Bogotá. (2011). *Política distrital de salud ambiental para Bogotá DC 2011-2023*. Recuperado el 12 de Octubre de 2016, de
<http://ambientebogota.gov.co/politica-distrital-de-salud-ambiental-para-bogota-d.c-2011-2023>
5. ANDEMOS. (25 de Enero de 2017). *Inventario de Emisiones de Vehículos en Colombia*. Recuperado el 17 de Marzo de 2018, de Asociación Colombiana de Vehículos Automotores: <http://www.andemos.org/wp-content/uploads/2017/03/Presentacion-ANDEMOS-Emisiones-01.25.2017-v8.pdf>
6. Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2010). *Simulación de Aerosoles Atmosféricos*. Valle de Aburrá, Antioquia: Universidad Pontificia Bolivariana. Recuperado el 8 de 12 de 2016, de
<http://www.metropol.gov.co/CalidadAire/IsdocCalidadAire/Simulaci%C3%B3n%20de%20Aerosoles%20Atmosf%C3%A9ricos.pdf>
7. Bautista, L. (2010). *Evaluación de las características físicas y químicas del material particulado en Bogotá*. Obtenido de Doctoral Dissertation Uniandes.
8. Born, P., Tran, L., & Donaldson, K. (24 de Marzo de 2011). The carcinogenic action of crystalline silica: A review of the evidence supporting secondary inflammation-driven genotoxicity as a principal mechanism. *Critical Reviews in Toxicology*, 49(9), 756-770. Recuperado el 1 de Septiembre de 2018, de
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21923565>
9. Cámara de Comercio. (2007). *Perfil Económico y Empresarial de La Candelaria*. Bogotá: LEGIS S.A. Recuperado el 14 de Diciembre de 2016, de
<http://bibliotecadigital.ccb.org.co/handle/11520/2916>

10. Carugno, M., Dentali, F., Mathieu, G., Fontanella, A., Mariani, J., Bordini, L., . . . Pesatori, C. (2018). PM10 exposure is associated with increased hospitalizations for respiratory syncytial virus bronchiolitis among infants in Lombardy, Italy. *Environmental Research*(166), 452-457.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.06.016>
11. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. (s.f). *Curso de autoinstrucción: Introducción a la toxicología de la contaminación del aire*. Recuperado el 22 de Octubre de 2016, de Toxicología Ambiental:
http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsci/e/fulltext/toxicol/frame_t.html
12. DANE. (2017). *Defunciones no fetales*. Recuperado el 12 de Abril de 2018, de Departamento Administrativo Nacional Estadístico:
<https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/salud/nacimientos-y-defunciones/defunciones-no-fetales>
13. Defra. (s.f). *What is Particulate Matter?* Recuperado el 24 de Septiembre de 2016, de Particulate Matter in the United Kingdom: <https://uk-air.defra.gov.uk/assets/documents/reports/aqeg/ch2.pdf>
14. ECOPETROL. (6 de Diciembre de 2012). *Boletines de prensa*. Recuperado el 10 de Diciembre de 2016, de Ecopetrol entrega diesel con menos azufre para todo el país:
<http://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/sala-de-prensa/boletines-de-prensa/Boletines-2012/contenido/Ecopetrol-entrega-diesel-con-menos-azufre-para-todo-el-pais>
15. EPA. (Noviembre de 1996). *Ambient levels of noncancer health effects of inhaled crystalline and amorphous silica*. Recuperado el 1 de Septiembre de 2018, de Health Issues Assessment:
<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P100CTTF.PDF?Dockkey=P100CTTF.PDF>
16. EPA. (2003). *Particle Pollution*. Recuperado el 13 de Febrero de 2016, de Environmental Protection Agency of the United States:
<http://cfpub.epa.gov/airnow/index.cfm?action=aqibasics.particle>
17. EPA. (29 de Octubre de 2004). *US EPA RISK ASSESMENT PORTAL*. Recuperado el 15 de Diciembre de 2016, de Air Quality Criteria for Particulate Matter:
<https://cfpub2.epa.gov/ncea/risk/recordisplay.cfm?deid=22516>
18. EPA. (Diciembre de 2009). *US Environmental Protection Agency*. Recuperado el 22 de Septiembre de 2016, de Integrated Science Assessment (ISA) for Particulate Matter: <https://www.epa.gov/isa/integrated-science-assessment-isa-particulate-matter>
19. EPA. (2010). *Motor Vehicle Emissions Simulator*. Recuperado el 20 de Diciembre de 2016, de MOVES: User Guide:
https://nnsa.energy.gov/sites/default/files/nv_sweis/appendixD/EPA%202009.pdf

20. EPA. (5 de Abril de 2014). *Framework for Human Health Risk Assessment to Inform Decision Making*. Recuperado el 22 de Febrero de 2018, de Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/risk/framework-human-health-risk-assessment-inform-decision-making>
21. EPA. (2014). *MOVES Training Sessions*. Recuperado el 20 de Febrero de 2017, de Environmental Protection Agency of the United States: <https://www.epa.gov/moves/moves-training-sessions>
22. EPA. (2015). *Environmental Protection Agency of the United States*. Recuperado el 13 de Febrero de 2016, de http://cfpub.epa.gov/airnow/index.cfm?action=particle_health.index
23. EPA. (2 de Febrero de 2016). *U.S. Environmental Protection Agency*. Recuperado el 24 de Marzo de 2016, de Emissions Factors & AP 42: <https://www3.epa.gov/ttnchie1/ap42/>
24. EPA. (2 de Febrero de 2016). *United States Environmental Protection Agency*. Recuperado el 24 de Marzo de 2016, de Modeling and Inventories: <https://www3.epa.gov/otaq/models/moves/>
25. Estévez García, J. A., Rojas Roa, N. Y., & Rodríguez Pulido, A. I. (2013). Exposición ocupacional a contaminantes atmosféricos: material particulado y síntomas respiratorios en policías de tránsito de Bogotá. *Revista Salud Pública*, 15(6), 889-902.
26. Fontes, T., & Barros, N. (2010). Interpolation of air quality monitoring data in an urban sensitive area. *Revista da Faculdade de Ciência e Tecnologia*(7), 6-18. Recuperado el 30 de Diciembre de 2016, de <http://bdigital.ufp.pt/handle/10284/2334?locale=en>
27. Franco, J., Rojas, N., Sarmiento, O., & Behrentz, E. (2013). Caracterización de la calidad del aire en microambientes de colegios distritales en Bogotá. *Ingeniería e Investigación*, 33(2), 42-48.
28. Gaitán, M., Cancino, J., & Behrentz, E. (Enero de 2009). Análisis del estado de la calidad del aire en Bogotá. *B- Universidad de los Andes Colombia*(26), 81-92. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-49932007000200011&lng=en&tlng=es
29. García Lozada, H. M. (2006). Evaluación del Riesgo por Emisiones de Partículas en Fuentes Estacionarias de Combustión - Estudio de Caso: Bogotá. *Ingeniería e Investigación*, 29(3), 15-23.
30. Herrera, D. (2007). *Modelo de Emisiones Vehiculares para la Ciudad de Bogotá (EVB)*. Recuperado el 17 de Abril de 2017, de Universidad de los Andes: http://oab2.ambientebogota.gov.co/apc-aa-files/57c59a889ca266ee6533c26f970cb14a/Emisionesvehiculares_Bogot%E1.pdf

31. IDEAM. (2010). *CARACTERÍSTICAS CLIMATOLÓGICAS DE CIUDADES PRINCIPALES Y MUNICIPIOS TURÍSTICOS*. Recuperado el 16 de Diciembre de 2016, de <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/1Sitios+turisticos2.pdf/cd4106e9-d608-4c29-91cc-16bee9151ddd>
32. IDEAM. (2017). *Lanzamiento del Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia*. Recuperado el 28 de Agosto de 2018, de Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales: http://www.siac.gov.co/web/sala-de-prensa/noticias/-/asset_publisher/96oXgZAhHrhJ/content/lanzamiento-del-informe-del-estado-de-la-calidad-del-aire-en-colombia-2017
33. International Agency for Research on Cancer. (2012). SOOT, AS FOUND IN OCCUPATIONAL. *IARC Monographs*, 100F, 209-214. Recuperado el 10 de Diciembre de 2016, de <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol100F/mono100F-21.pdf>
34. Jaramillo Juárez, F., Rincón Sánchez, A. R., & Rico Martínez, R. (2009). *Toxicología Ambiental* (Primera ed.). Aguascalientes, México: Universidad Autónoma de Aguascalientes.
35. Kumar, S., & Rajkumar, R. (2014). Characterization of minerals in air dust particles in the state of Tamilnadu, India through FTIR, XRD and SEM analyses. *Infrared physics and technology*(67), 30-41.
36. Lafuente, B., Downs, R., Yang, H., & Stone, N. (2015). The power of databases: the RUFF project. *Highlights in Mineralogical Crystallography*, 1-30. Recuperado el 5 de Junio de 2018, de <http://rruff.info/about/downloads/HMC1-30.pdf>
37. Li, G., Li, Y., Zhang, H., Li, H., Gao, G., Zhou, Q., . . . Zhang, Q. (2016). Variation of airborne quartz in air of Beijing during the Asia-Pacific Economic Cooperation Economic Leaders' Meeting. *Journal of Environmental Sciences*, 39, 62-68. Recuperado el 1 de Septiembre de 2018, de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1001074215004349>
38. Londoño, L. A., & Cañón, J. E. (Julio de 2015). Imputation of spatial air quality data using gis-spline and the index of agreement in sparse urban monitoring networks. *Revista Facultad de Ingeniería*(76), 73-81. Recuperado el 30 de Diciembre de 2016, de <https://dx.doi.org/10.17533/udea.redin.n76a09>
39. MADS. (1 de Noviembre de 2017). *MADS*. Recuperado el 22 de Enero de 2018, de Resolución 2254 de 2017: <http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/96-res%202254%20de%202017.pdf>

40. MADS. (s.f). *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*. Recuperado el 20 de Septiembre de 2016, de Sistema de Información de la Política Nacional de Calidad del Aire: <http://web2006.minambiente.gov.co:8091/Default2.aspx>
41. MAVDT. (Octubre de 2010). *Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial*. Recuperado el 12 de Diciembre de 2016, de PROTOCOLO PARA EL CONTROL Y VIGILANCIA DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA GENERADA POR FUENTES FIJAS:
http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/emisiones_atmosfericas_contaminantes/Protocolo_Fuentes_Fijas_V2.pdf
42. MAVDT. (2010 de Octubre de 2010). *Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial*. Recuperado el 12 de Diciembre de 2016, de Protocolo para el Monitoreo y Vigilancia de la Calidad del Aire - Manual de Operación:
http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/contaminacion_atmosferica/Protocolo_Calidad_del_Aire_-_Manual_Operaci%C3%B3n.pdf
43. Ministerio de Ambiente. (2010). *Resolución 610 del 2010*. Recuperado el 9 de Marzo de 2016, de <http://www.alcaldiabogota.gov.vo/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=39330>
44. Ministerio de Obras Públicas y Transportes. (1980). *Glosario de contaminación de aire*. Madrid.
45. MINTRABAJO. (s.f). *Jornada de Trabajo*. Recuperado el 4 de Diciembre de 2016, de Ministerio de Trabajo: <http://www.mintrabajo.gov.co/preguntas-frecuentes/jornada-de-trabajo.html>
46. Mohamed, A., Jaafar, J., Ismail, A., Othman, M., & Rahman, M. (2017). Membrane Characterization. En N. Hilal, A. Ismail, T. Matsuura, & D. Oatley-Radcliffe (Edits.), *Membrane Characterization* (págs. 3-29). Elsevier. Recuperado el 23 de Mayo de 2018, de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444637765000012>
47. Morakinyo, O., Adebawale, A., Mokgobu, M., & Mukhola, M. (2017). Health risk of inhalation exposure to sub-10 μm particulate matter and gaseous pollutants in an urban-industrial area in South Africa: an ecological study. *BMJ Open*, 3(7), 1-9. Recuperado el 25 de Mayo de 2018, de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5353259/>
48. Muthiah, V., De Palma, G., Manerba, A., Goldoni, M., Triggiani, M., Apostoli, P., . . . Nodari, S. (Abril de 2018). Risk of Cardiovascular Hospitalizations from Exposure to Coarse Particulate Matter (PM10) Below the European Union Safety Threshold. *The American Journal of Cardiology*, 117(8), 1231-1235.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.amjcard.2016.01.041>
49. Nebel, B., & Wright, R. (1999). *Ciencias ambientales: Ecología y desarrollo sostenible*. Madrid: Pearson.

50. Nevers, N. (1998). *Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire*. México: McGraw-Hill.
51. Observatorio de Desarrollo Económico. (29 de Julio de 2015). *Boletín de La Candelaria*. Recuperado el 20 de Octubre de 2017, de Tasa de Ocupación: <http://observatorio.desarrolloeconomico.gov.co/base/lectorpublic.php?id=589#sthash.b2Ln2rXz.dpbs>
52. Oh, I., Lee, J., Ahn, K., Kim, J., Kim, Y.-M., Sim, C. S., & Kim, Y. (Enero de 2018). Association between particulate matter concentration and symptoms of atopic dermatitis in children living in an industrial urban area of South Korea. *Environmental Research*, 160, 465-468. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.10.030>
53. Organización Meteorológica Mundial. (Enero de 2013). *WMO*. Recuperado el 12 de Marzo de 2016, de Global Atmosphere Watch: http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/documents/Final_GAW_205.pdf
54. Organización Mundial de la Salud. (2005). *World's Health Organization*. Recuperado el 7 de Abril de 2016, de Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre: http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/69478/1/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf
55. Organización Panamericana de la Salud. (s.f). *La Dispersión de las Plumas y el Modelado de la Calidad del Aire*. Recuperado el 12 de Octubre de 2017, de Curso de orientación para el control de la contaminación del aire: http://www.bvsde.paho.org/cursoa_meteoro/lecc6/lecc6_4.html
56. Park, S.-H. (2018). Types and Health Hazards of Fibrous Materials Used as Asbestos Substitutes. *Safety and Health at Work*, 1-5. Recuperado el 1 de Septiembre de 2018, de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2093791118300933>
57. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2009). Recuperado el 16 de Marzo de 2016, de Contaminantes: Partículas (PM): http://www.unep.org/tnt-unep/toolkit_esp/pollutants/facts.html
58. Programa Regional Aire Limpio de Perú. (Junio de 2007). *Ambientalex - El portal ambiental*. Recuperado el 21 de Septiembre de 2016, de El Azufre en los Combustibles en el Perú: ambientalex.info
59. Quijano, A., Henao, J., & Juliana, Q. (2010). Caracterización fisicoquímica del material particulado fracción respirable PM_{2.5} en Pamplona. *Revista Bitsua*, 8(1), 53-66.
60. Recio del Bosque, F. H. (1998). *Química general* (Primera ed.). México, D.F.: McGraw-Hill Interamericana. Recuperado el 12 de Diciembre de 2016

61. Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá. (2016). *Informe Anual de Calidad del Aire de Bogotá Año 2015*. Bogotá: Secretaría Distrital de Ambiente. Recuperado el 4 de Diciembre de 2016, de http://201.245.192.252:81/App_Files/Informe_Anuar_RMCAB_2015.pdf
62. Rojano, R., Pérez, J., & Freyle, E. (Agosto de 2012). Efecto de la humedad relativa en la determinación de PM10 utilizando un DataRam 4, en una zona costera de Colombia. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 2(35), 204-212. Recuperado el 22 de Mayo de 2018, de http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-07702012000200010&lng=es&tlng=es
63. Rojas Bracho, L., & Garibay Bravo, V. (2009). Las partículas suspendidas, aeropartículas o aerosoles: ¿hacen daño a la salud?; ¿podemos hacer algo? *Gaceta Ecológica*(69), 29-44.
64. Rojas, N. Y. (2007). *Aire y problemas ambientales de Bogotá*. Bogotá, Colombia: Friedrich-Ebert-Stiftung. Recuperado el 10 de Diciembre de 2016, de http://oab.ambientebogota.gov.co/apc-aa-files/57c59a889ca266ee6533c26f970cb14a/aire_y_problemas_ambientales_de_bogota.pdf
65. Sánchez, J., Valdés, S., & Ostro, B. (1998). Los Efectos en la Salud de la Contaminación Atmosférica por PM10 en Santiago. *Estudios Públicos*(69), 126-154.
66. Sbarato, V. (2000). Análisis y caracterización del material particulado atmosférico. *Universidad Nacional de Córdoba*.
67. SDA. (2009). *Secretaría Distrital de Ambiente - Elementos Técnicos del Plan Decenal de Descontaminación del Aire de Bogotá*. Recuperado el 30 de Diciembre de 2016, de Inventario de Emisiones Provenientes de Fuentes Fijas y Móviles: http://oab.ambientebogota.gov.co/apc-aa-files/57c59a889ca266ee6533c26f970cb14a/elementos_tecnicos_plan_decenal_parte_2.pdf
68. SDA. (22 de Abril de 2015). *Secretaría Distrital de Ambiente*. Recuperado el 26 de Diciembre de 2016, de Informe No. 1 Segundo Día sin carro 2015: <http://oab2.ambientebogota.gov.co/es/documentacion-e-investigaciones/resultadobusqueda/informe-no-1-segundo-dia-sin-carro-2015>
69. SDA. (2015). *Secretaría Distrital de Ambiente*. Recuperado el 10 de Diciembre de 2016, de Informe Final DSC 5 de febrero de 2015: http://201.245.192.252:81/App_Files/Informe%20final%20DSC%205%20de%20febrero%20de%202015.pdf
70. SDA. (24 de Agosto de 2015). *Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá - Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá*. Recuperado el 12 de Diciembre de 2016, de Información Meteorológica: <http://201.245.192.252:81/>

71. SDA. (23 de Marzo de 2018). *Informe Técnico No. 00422*. Recuperado el 12 de Abril de 2018, de Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Bogotá - Eventos IBOCA: <http://201.245.192.252:81/>
72. SDA. (Junio de 2018). *Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá*. Recuperado el 16 de Junio de 2018, de Reporte por Estaciones: <http://201.245.192.252:81/>
73. SDP. (2009). *Secretaría Distrital de la Planeación*. Recuperado el 14 de Diciembre de 2016, de Localidad de La Candelaria: Diagnóstico de los Aspectos Físicos, Demográficos y Socioeconómicos: <http://www.sdp.gov.co/portal/page/portal/PortalSDP/InformacionEnLinea/InformacionDescargableUPZs/Localidad%2017%20candelaria/Monografia/17%20Localidad%20de%20La%20Candelaria.pdf>
74. Secretaría de Hacienda. (2013). *Instituto de Estudios Urbanos*. Recuperado el 20 de Abril de 2017, de Red Bogotá: <http://www.institutodeestudiosurbanos.info/endatos/0100/0110/0116-clima/index.htm>
75. Secretaría Distrital de Ambiente. (15 de Marzo de 2015). Recuperado el 12 de Marzo de 2016, de Observatorio Ambiental de Bogotá: <https://oab.ambientebogota.gov.co/es/inicio>
76. Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá. (2010). *Alcaldía Mayor de Bogotá*. Recuperado el 12 de Marzo de 2016, de Plan Decenal de Descontaminación del Aire para Bogotá: http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/adminverblobawa?tabla=T_NORMA_ARCHIVO&p_NORMFIL_ID=930&f_NORMFIL_FILE=X&inputfileext=NORMFIL_FILENAME
77. Servicio Meteorológico Nacional del Reino Unido. (2016 de Julio de 2016). *Met Office*. Recuperado el 16 de Diciembre de 2016, de What is the difference between mist and fog?: <http://www.metoffice.gov.uk/learning/fog/difference-mist-and-fog>
78. Stocker, T., Plattner, D., Tignor, M., Allen, S., Boschung, J., Nauels, A., . . . Midgley, P. (2016). *Glosario: Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. IPCC. Cambridge, USA: Cambridge University Press. Recuperado el 12 de Diciembre de 2016, de https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WGI_AR5_glossary_ES.pdf
79. Takahashi, K., & Landrigan, P. (2016). The Global Health Dimensions of Asbestos and Asbestos-Related Diseases. *Annals of Global Health*, 82(1), 209-213. Recuperado el 1 de Septiembre de 2018, de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214999616000205>
80. Unal, Y., Toros, H., Deniz, A., & Incecik, S. (2011). Influence of meteorological factors and emission sources on spatial and temporal variations of PM10

concentrations in Istanbul metropolitan area. *Atmospheric Environment*(45), 5504-5513. doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.06.039>

81. UNEP. (Febrero de 2007). *Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente*. Recuperado el 11 de Agosto de 2016, de Informe del Grupo de Trabajo sobre Azufre de la Alianza para Combustibles y Vehículos Limpios:
<http://www.unep.org/transport/pcf/PDF/SulphurReportSpanish.pdf>
82. Universidad de Barcelona. (s.f). *Reguera Research Group*. Recuperado el 10 de Diciembre de 2016, de Introduction to Nucleation:
http://www.ffn.ub.edu/davidr/index.php?option=com_content&view=article&id=44:introduction-to-nucleation&catid=34:nucleation&Itemid=58
83. Vahur, S. (s.f). *Database of ATR-FTIR spectra of various materials*. Recuperado el 23 de Mayo de 2018, de Institute of Chemical Physics of the University of Tartu:
http://lisa.chem.ut.ee/IR_spectra/paint/fillers/quartz/
84. Vargas, F., Rojas, N., Pachón, J., & Russell, A. (2012). PM10 characterization and source appointment at two residential areas in Bogotá. *Atmospheric Pollution Research*, 3(1), 72-80.
85. Wark, K., & Warner, F. (1995). *Contaminación del aire: Origen y control* (Sexta ed.). México: Noriega Editores.
86. Wells, I., Bhatt, R., & Flanagan, M. (1985). Kaolinosi: A radiological review. *Clinical Radiology*, 36(6), 579-582. Recuperado el 1 de Septiembre de 2018, de
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009926085802373>